



Universidade Estadual de Campinas  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação  
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica

# Gerenciamento de refrigeradores para redução do pico de demanda em Redes Inteligentes

Autor: **Glauco Niro**

Orientador: **Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva**

*Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica*

Área de Concentração: **Energia Elétrica**

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva

Prof. Dr. Alexandre de Assis Mota

Prof. Dr. Madson Cortes de Almeida

FEEC/UNICAMP

PUC – Campinas

FEEC/UNICAMP

Campinas/SP, 27 de maio de 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNI-  
CAMP

N629g      Niro, Glauco  
Gerenciamento de refrigeradores para redução do  
pico de demanda em redes inteligentes / Glauco Niro. --  
Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientador: Luiz Carlos Pereira da Silva.  
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Com-  
putação.

1. Energia elétrica - Distribuição. 2. Refrigeradores.  
3. Sistemas inteligentes. I. Silva, Luiz Carlos Pereira da.  
II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: Smart management of refrigerators for peak load reduc-  
tion

Palavras-chave em Inglês: Electricity - Distribution, Refrigerators, Intelli-  
gent systems

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Alexandre de Assis Mota, Madson Cortes de Almeida

Data da defesa: 27/05/2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

## COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

**Candidato:** Glauco Niro

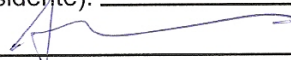
**Data da Defesa:** 27 de maio de 2011

**Título da Tese:** "Gerenciamento de Refrigeradores para Redução do Pico de Demanda em Redes Inteligentes"

Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva (Presidente):



Prof. Dr. Alexandre de Assis Mota:



Prof. Dr. Madson Cortes de Almeida:







*“Erros são, no final das contas, fundamentos da verdade. Se um homem não sabe o que uma coisa é, já é um avanço do conhecimento saber o que ela não é.”*

*Carl Sagan (1934-1996)*



# Agradecimentos

- Primeiramente a Deus pela vida;
- Aos meus pais, Vlademir e Soraia, pela formação pessoal e profissional que me deram, pelo amor, ensinamentos, incentivo e apoio em todas as fases de minha vida. À minha irmã Lívia, por todos os momentos e também a toda a minha família;
- À Cecília, pelos momentos vividos, fossem eles bons ou ruins, pelo carinho e incentivo. Também à sua família em Goiânia, que sempre me recebeu tão bem;
- Ao meu orientador, professor Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva, pela possibilidade que me foi dada, pela confiança e ensinamentos.
- A todos os professores do Departamento de Sistemas de Energia Elétrica, em especial ao professor Dr. Walmir de Freitas Filho, que foi meu primeiro contato para que o mestrado fosse possível. À professora Dra. Roberta Ceriani, cuja ajuda na parte de transferência de calor foi de fundamental importância;
- A todos os amigos do departamento pela amizade e ajuda. Do LE 19: Jorge, Danilo, Eline, Silvio, Anzai e Beatriz. Do LE47: Fernanda, Paulo, Hugo, Diogo e Tiago, que foi um grande incentivador para essa jornada e do bom LE 23: David, Marcos e Paulo.
- Aos amigos da graduação, tanto os que pude continuar a manter convívio quanto os que se espalharam pelo mundo. Aos amigos Juan, Diana e Luiz Eduardo.
- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo apoio financeiro.



# Resumo

Os sistemas elétricos vêm sendo alvo de estudos que buscam torná-los mais inteligentes e seguros. Um novo paradigma surge com o conceito das redes inteligentes (smart grids), as quais incluem como uma das suas características principais a integração de equipamentos dos consumidores de forma ativa à operação do sistema elétrico. Um exemplo é o gerenciamento da demanda no horário de pico, aliviando a carga e aumentando a segurança do sistema, com o objetivo de obter benefícios para o sistema elétrico e também para os consumidores. Para que isso seja possível, são necessários alguns requisitos e avanços tecnológicos: existência de um portal de comunicação para interface entre o consumidor e seus aparelhos e a concessionária; equipamentos que permitam tal gerenciamento sem prejudicar e interferir na rotina dos consumidores; e mecanismos de compensação financeira para incentivar a participação dos consumidores. Nesta dissertação se propõe um estudo sobre um aparelho que apresenta potencial para esse tipo de gerenciamento, o refrigerador doméstico. Devido a sua inércia térmica e isolamento o refrigerador pode ser ligado e desligado durante algum tempo sem prejuízos para sua função principal. Os objetivos deste trabalho são: desenvolver um modelo adequado para a simulação computacional de um grupo de refrigeradores; implementar esquemas de gerenciamento que visem a redução de consumo no horário de pico; bem como analisar o efeito que estes procedimentos acarretariam em uma rede de distribuição de energia elétrica, levando em conta a redução do consumo no período de pico, a redução de perdas e a melhoria do perfil de tensão.

Palavras Chave: Gerenciamento da Demanda, Medição Eletrônica, Refrigerador, Rede Inteligente



# Abstract

The electrical systems have been exposed to new researches and developments with the main objectives of a smarter and safer operation and planning. A new paradigm arises with the concept of smart grids, which include as one of its main characteristics the integration of consumer's appliances in the system operation in a more active way. An example is the demand-side management at peak time, relieving the load and increasing system security, in order to obtain benefits to the electrical system and also to consumers. In order to make this possible, some requirements and technological advances are necessary: the existence of a communication interface between the consumers and their appliances and the utility; smart appliances that allow such management without any damage or interference on the routine of the consumer; compensation mechanisms to encourage consumer participation. In this dissertation it is proposed a study about a device that has potential to this kind of management, the household refrigerator. Due to its thermal inertia and isolation, the refrigerator can be turned on and off for some time without degradation of its primary function. The objectives of this work are: development of an adequate model for the computational simulation of a group of refrigerators; implementation of management schemes to reduce the consumption at peak time; analysis of the impacts of such procedures to a distribution grid, taking into consideration the reduction of the consumption at the peak hours, reduction of losses and improvement on voltage profile.

**Keywords:** Load Management, Smart Metering, Refrigerator, Smart Grids





# Índice

<b>CAPÍTULO 1 - Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2 - Redes Inteligentes, Gerenciamento de Carga e Medição Eletrônica ...</b>	<b>5</b>
2.1 REDES INTELIGENTES .....	6
2.1.1 <i>Gerenciamento de carga</i> .....	6
2.1.1.1 Curvas de carga .....	7
2.1.1.2 Tipos de gerenciamento de carga .....	11
2.1.1.3 Benefícios do gerenciamento de carga. ....	12
2.1.1.4 Implementação do gerenciamento de carga.....	13
2.1.2 <i>Medição eletrônica</i> .....	14
2.1.2.1 Característica do parque de medição brasileiro .....	15
2.1.2.2 Experiências internacionais com medição eletrônica .....	15
2.1.2.3 Rede de transmissão de dados .....	16
2.1.2.4 Componentes necessários para adoção de medição eletrônica.....	17
2.1.2.5 Funcionalidades dos medidores eletrônicos .....	18
2.1.3 <i>Características e benefícios das Redes Inteligentes</i> .....	20
2.2 COMENTÁRIOS FINAIS .....	23
<b>CAPÍTULO 3 - Modelo do Refrigerador .....</b>	<b>25</b>
3.1 O REFRIGERADOR NO BRASIL .....	25
3.2 FUNCIONAMENTO DO REFRIGERADOR.....	26
3.3 DADOS DO REFRIGERADOR .....	27
3.4 MODELO DO REFRIGERADOR .....	27
3.4.1 <i>Cálculo da Condutividade Térmica do Ar (G)</i> .....	28
3.4.2 <i>Temperaturas de Funcionamento</i> .....	29
3.4.3 <i>Temperatura Ambiente</i> .....	29
3.4.4 <i>Abertura de Portas</i> .....	30
3.4.5 <i>Inserção de Alimentos</i> .....	31
3.5 VALIDAÇÃO DO MODELO.....	32
3.6 MODELO AGREGADO .....	37
3.7 REFRIGERADORES COM MELHORIAS .....	40
3.8 COMENTÁRIOS FINAIS .....	42
<b>CAPÍTULO 4 - Esquemas de Gerenciamento Do Refrigerador .....</b>	<b>43</b>
4.1 GERENCIAMENTO DIRETO .....	43
4.1.1 <i>Implementação no modelo</i> .....	44
4.1.2 <i>Resultados do Gerenciamento</i> .....	45
4.2 GERENCIAMENTO DIRETO EM GRUPOS.....	48
4.3 GERENCIAMENTO PELA TEMPERATURA MÉDIA.....	49
4.3.1 <i>Implementação no modelo</i> .....	50
4.3.2 <i>Resultados do Gerenciamento</i> .....	52
4.4 COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE GERENCIAMENTO.....	55
4.5 COMENTÁRIOS FINAIS .....	56

## **CAPÍTULO 5 - Impacto do Gerenciamento de Refrigeradores no Sistema Elétrico ..57**

5.1 SISTEMA UTILIZADO PARA ESTUDO .....	57
5.2 INCLUSÃO DO GERENCIAMENTO DOS REFRIGERADORES NO SISTEMA ELÉTRICO .....	58
5.3 RESULTADOS DA INSERÇÃO DO GERENCIAMENTO DE REFRIGERADORES NO SISTEMA ELÉTRICO .....	61
5.3.1 <i>Impacto do gerenciamento na demanda de potência ativa</i> .....	61
5.3.2 <i>Impacto do gerenciamento nas perdas ativas nos ramos do sistema</i> .....	67
5.3.3 <i>Impacto do gerenciamento no perfil de tensão do sistema</i> .....	69
5.4 RESULTADOS PARA REFRIGERADORES COM MELHORIAS .....	70
5.4.1 <i>Impacto no sistema elétrico do gerenciamento de refrigeradores com melhor             isolação térmica</i> .....	70
5.4.1.1 Impacto na demanda de potência ativa .....	70
5.4.1.2 Impacto nas perdas ativas do sistema .....	73
5.4.1.3 Impacto no perfil de tensão do sistema .....	75
5.4.2 <i>Impacto no sistema elétrico do gerenciamento de refrigeradores com menor             quantidade de abertura de portas</i> .....	76
5.4.2.1 Impacto na demanda de potência ativa .....	76
5.4.2.2 Impacto nas perdas ativas do sistema .....	79
5.4.2.3 Impacto no perfil de tensão .....	80
5.4.3 <i>Impacto no sistema elétrico do gerenciamento de refrigeradores com menor             influência da abertura de porta</i> .....	81
5.4.3.1 Impacto da demanda de potência ativa .....	81
5.4.3.2 Impacto nas perdas ativas do sistema .....	84
5.4.3.3 Impacto no perfil de tensão .....	85
5.5 COMPARAÇÃO DAS MELHORIAS .....	86
5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	87
<b>CAPÍTULO 6 - Conclusões .....</b>	<b>89</b>
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	91
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS .....</b>	<b>93</b>
<b>APÊNDICE A - Transferencia de Calor .....</b>	<b>97</b>
A.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO .....	97
A.1.1 <i>Condução de Calor em Paredes Planas</i> .....	97
A.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO .....	99
A.3 CONDUÇÃO E CONVECÇÃO EM SÉRIE .....	99

# Lista de Figuras

Figura 2.1 – Modelo atual do sistema elétrico .....	5
Figura 2.2 – Curva de carga residencial .....	7
Figura 2.3 – Curva de carga comercial .....	8
Figura 2.4 – Curva de carga industrial .....	8
Figura 2.5 – Curva de carga de iluminação pública .....	9
Figura 2.6 – Curva de carga típica .....	9
Figura 2.7 – Curva de carga do SIN no dia 21/09/2007 .....	10
Figura 2.8 – Gerenciamento tipo redução do pico .....	11
Figura 2.9 – Gerenciamento tipo enchimento dos vales .....	11
Figura 2.10 – Gerenciamento tipo deslocamento de carga .....	12
Figura 2.11 – Gerenciamento tipo conservação estratégica .....	12
Figura 2.12 – Modelo de rede com adoção de Redes Inteligentes .....	20
Figura 3.1 – Esquemático do refrigerador. ....	26
Figura 3.2 – Temperatura ambiente ao longo de um dia .....	30
Figura 3.3 – Modelo do refrigerador implementado no Simulink.....	32
Figura 3.4 – Temperatura interna do refrigerador durante as 2 primeiras horas do dia (a) comparado com temperaturas obtidas através de medições (b) . ....	33
Figura 3.5 – Influência da temperatura ambiente no funcionamento do refrigerador. ....	34
Figura 3.6 – Influência da abertura de porta no funcionamento do refrigerador.....	36
Figura 3.7 – Influência quantidade de inserção de alimentos no funcionamento do refrigerador. ....	36
Figura 3.8 – Bloco criado para o modelo de um refrigerador. ....	37
Figura 3.9 – Esquema do modelo de 100 refrigeradores.....	37
Figura 3.10 – Diagrama interior do modelo de 100 refrigeradores.....	38
Figura 3.11 – Conjunto de refrigeradores unitários formando parte do modelo de 100 refrigeradores. ....	38
Figura 3.12 – Temperatura para um grupo de 100 refrigeradores ao longo de um dia (a) e num período de 2 horas em destaque (b).....	39
Figura 3.13 – Funcionamento de um grupo de 100 refrigeradores. Em vermelho o refrigerador está desligado enquanto que em verde está ligado.....	40
Figura 4.1 - Implementação do gerenciamento direto.....	45
Figura 4.2 – Comparação da temperatura interna de um refrigerador com e sem gerenciamento. ....	45
Figura 4.3 – Demanda de potência num grupo de 100 refrigeradores com e sem gerenciamento direto. ....	47
Figura 4.4 – Demanda de potência num grupo de 100 refrigeradores com e sem gerenciamento direto por subgrupos. ....	49
Figura 4.5 – Temperaturas limites de funcionamento do refrigerador com gerenciamento.....	51
Figura 4.6 – Implementação do gerenciamento por temperatura media no modelo do refrigerador.....	51
Figura 4.7 – Resultado do gerenciamento para três casos: (a) consumo menor, (b) consumo maior e (c) consumo igual na presença de gerenciamento.....	52

Figura 4.8 – Temperatura de um grupo de 100 refrigeradores com gerenciamento (a) ao longo do dia e (b) com destaque para o período do gerenciamento. ....	54
Figura 4.9 – Temperatura média de um grupo de 100 refrigeradores com e sem gerenciamento. ....	54
Figura 4.10 – Demanda de potência de um grupo de 100 refrigeradores com e sem gerenciamento pela temperatura média. ....	55
Figura 5.1 – Sistema elétrico utilizado. ....	57
Figura 5.2 – Curva de carga do sistema. ....	58
Figura 5.3 – Fluxograma da inserção do gerenciamento no sistema elétrico. ....	60
Figura 5.4 – Demanda de potência ativa na subestação com e sem gerenciamento. ....	62
Figura 5.5 – Demanda de potência ativa nas barras 6 (a), 20 (b), 11(c) e 49 (d). ....	64
Figura 5.6 – Demanda de potência ativa com e sem gerenciamento em todas as barras (a) e diferença em % (b) no horário de maior carregamento do sistema. ....	66
Figura 5.7 – Redução da demanda na hora da ponta do subsistema SE/CO ....	66
Figura 5.8 – Perdas ativas totais no sistema. ....	67
Figura 5.9 – Perdas ativas nos ramos do sistema com e sem gerenciamento (a) e variação percentual (b) no horário de maior carregamento do sistema. ....	68
Figura 5.10 – Perfil de tensão do sistema no horário de maior carregamento do sistema. ..	69
Figura 5.11 – Barras do sistema onde houve melhoria no perfil de tensão. ....	70
Figura 5.12 – Demanda de potência ativa na subestação do sistema com refrigeradores com melhor isolamento térmica. ....	71
Figura 5.13 – Demanda de potência ativa em cada barra sem gerenciamento e isolamento melhor e com gerenciamento e isolamento melhor (a) e redução em % (b) no horário de maior carregamento do sistema. ....	73
Figura 5.14 – Perdas ativas totais no sistema sem gerenciamento e isolamento normal e com gerenciamento e isolamento melhor. ....	74
Figura 5.15 – Perdas ativa em cada ramo sem gerenciamento e isolamento normal e com gerenciamento e isolamento melhor em todas as barras (a) e redução em % (b) no horário de maior carregamento do sistema. ....	75
Figura 5.16 – Perfil de tensão em cada barra do sistema no horário de maior carregamento do sistema. ....	76
Figura 5.17 – Demanda de potência ativa na subestação do sistema com refrigeradores com quantidade menor de abertura de portas. ....	77
Figura 5.18 – Demanda de potência ativa em cada barra sem gerenciamento e quantidade maior de abertura de porta e com gerenciamento e quantidade menor de abertura de porta (a) e redução em % (b) no horário de maio carregamento do sistema. ....	78
Figura 5.19 – Perdas ativa total sem gerenciamento e quantidade maior de abertura de porta e com gerenciamento e quantidade menor de abertura de porta. ....	79
Figura 5.20 – Perdas ativa em cada barra sem gerenciamento e quantidade maior de abertura de porta e com gerenciamento e quantidade menor de abertura de porta (a) e redução em % (b) no horário de maior carregamento do sistema. ....	80
Figura 5.21 – Perfil de tensão em cada barra do sistema no horário de maior carregamento com gerenciamento e refrigeradores com menor quantidade de abertura de portas. ....	81
Figura 5.22 – Demanda de potência ativa na subestação do sistema com menor influência de abertura de portas no refrigerador. ....	82

Figura 5.23 – Demanda de potência ativa em cada barra sem gerenciamento e maior influência da abertura de porta e com gerenciamento e menor influência da abertura de porta (a) e redução em % (b) no horário de maior carregamento do sistema. ....	83
Figura 5.24 – Perdas ativas no sistema sem gerenciamento e com maior influência da abertura de porta e com gerenciamento e menor influência. ....	84
Figura 5.25 – Perdas ativa em cada barra sem gerenciamento e maior influencia de abertura de porta e com gerenciamento e menor influência de abertura de porta (a) e redução em % (b) no horário de maior carregamento do sistema. ....	85
Figura 5.26 – Perfil de tensão em cada barra do sistema no horário de maior carregamento do sistema com gerenciamento e refrigeradores com menor influência da abertura de portas. ....	86
Figura A.1 - Distribuição da temperatura através de parede plana para condução em caso estacionário. ....	98
Figura A.2 - Analogia entre sistemas térmicos e circuitos elétricos. ....	98
Figura A.3 - Transferência de calor entre dois fluídos separados por uma parede. ....	100
Figura A.4 - Sistema térmico composto por várias paredes. ....	100



# Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Distribuição de frequência de idade dos medidores do parque nacional (%)..	15
Tabela 2.2 – Distribuição dos medidores por tipo (%).....	15
Tabela 3.1 - Dados do refrigerador.....	27
Tabela 3.2 - Dados do funcionamento de um refrigerador.....	33
Tabela 3.3 - Dados de funcionamento do refrigerador para diferentes temperaturas ambiente.....	35
Tabela 3.4 - Comparativo do consumo mensal em kWh de um grupo de 100 refrigeradores com melhorias e características originais do modelo. ....	42
Tabela 4.1 - Características de funcionamento do refrigerador com e sem gerenciamento direto. ....	46
Tabela 4.2 – Comparação do funcionamento do refrigerador com e sem gerenciamento para três casos. ....	52
Tabela 5.1 - Quantidade de refrigeradores em cada barra. ....	59
Tabela 5.2 – Comparativo do consumo diário (MWh) de energia com e sem gerenciamento. ....	63
Tabela 5.3 – Comparação dos resultados para os diferentes tipos de isolamento. ....	71
Tabela 5.4 – Comparação do consumo diário de energia nos diferentes casos de isolamento térmica. ....	72
Tabela 5.5 – Comparativo do consumo diário de energia (MWh) sem gerenciamento e isolamento normal (A) e com gerenciamento e isolamento melhor (B).....	72
Tabela 5.6 – Comparativo do consumo diário de energia (MWh) para as diferentes quantidades de abertura de porta. ....	77
Tabela 5.7 – Comparativo do consumo diário de energia (MWh) sem gerenciamento e quantidade maior de abertura de porta (A) e com gerenciamento e quantidade menor de abertura de porta (B). ....	78
Tabela 5.8 – Comparativo do consumo diário de energia (MWh) para as diferentes influência de abertura de porta. ....	82
Tabela 5.9 – Comparativo do consumo diário de energia (MWh) sem gerenciamento e maior influência da abertura de porta (A) e com gerenciamento e menor influência da abertura de porta (B). ....	83
Tabela 5.10 - Quadro comparativo geral dos resultados obtidos. ....	86





# Capítulo 1

## Introdução

Durante as últimas décadas, as mais diversas áreas da humanidade experimentaram um grande avanço tecnológico. No entanto, enquanto em áreas como a informática houve um grande avanço em pouco tempo, outras, como a área de distribuição de energia elétrica, permaneceram sem mudanças substanciais. Por exemplo, os medidores de energia atualmente em uso são praticamente iguais aos que vêm sendo utilizados há quase um século e na maioria dos casos as concessionárias ainda necessitam que os consumidores avisem quando há interrupção no fornecimento de energia.

A demanda de energia elétrica vem aumentando a cada dia sem o acompanhamento proporcional da infraestrutura dos sistemas de geração, transmissão e distribuição. Com isso, os sistemas elétricos operam cada vez mais próximos de seus limites de capacidade, aumentando também o risco de falhas e apagões que podem afetar grandes áreas através de efeito cascata. As concessionárias de energia devem buscar o atendimento da demanda mantendo o sistema seguro, além de fornecer energia com a qualidade que os modernos aparelhos requerem ([1]).

Ainda assim, a solução tradicional adotada para atender essa demanda crescente e garantir a segurança da operação do sistema elétrico tem sido a construção de novas usinas e linhas, aumentando a capacidade de geração e transmissão, mesmo que seja a uma taxa mais lenta comparada ao crescimento da demanda. Entretanto, novas usinas, principalmente as térmicas movidas a combustível não-renovável, encarecem a energia, além de causar grandes impactos ambientais. Assim, começa a ser pensado um novo modelo para o sistema elétrico, que seja mais inteligente, que consiga atender a demanda de potência com melhor qualidade utilizando a estrutura atual do sistema, postergando assim investimentos ([1],[2]).

Um tipo de rede que vem sendo a aposta de como será a rede elétrica no futuro são as chamadas redes inteligentes, alvo de inúmeros estudos e investimentos das empresas

de energia e de governos. Nesse tipo de rede, haverá comunicação bidirecional, ou seja, todos os envolvidos no sistema elétrico trocarão informações entre si. Isso permitirá que os consumidores participem de modo mais ativo na operação do sistema elétrico.

A participação do consumidor poderá ser feita através do gerenciamento de equipamentos, permitindo que seja feito controle de tensão, de frequência, que se controle a demanda de potência em determinados momentos, podendo reduzi-la no período de maior carregamento do sistema ou auxiliando na recomposição após a ocorrência de contingências ([4]).

Para que esse gerenciamento seja possível, alguns requisitos devem ser adotados: medição eletrônica, que será responsável pela interface entre os equipamentos dos consumidores e o sistema elétrico; tarifas diferenciadas ao longo do dia, desestimulando o uso de equipamentos em momentos indesejáveis para o sistema elétrico; o equipamento a ser gerenciado deve ter potencial energético e técnico para tal, sem provocar transtornos e prejuízos para o usuário e para a função principal de cada dispositivo.

Um aparelho que cumpre esses requisitos é o refrigerador doméstico. Seu potencial técnico deve-se a sua isolamento e inércia térmica que permitem que ele seja desligado por um intervalo de tempo sem que isso cause prejuízos a sua operação normal. O potencial energético é mostrado no 0.

Assim, neste trabalho propõe-se estudar o potencial e o impacto que o gerenciamento de refrigeradores domésticos pode proporcionar ao sistema elétrico, especificamente na redução da demanda de potência elétrica nos horários de maior carregamento do sistema, na diminuição das perdas e na melhoria do perfil de tensão da rede.

Essa dissertação apresenta-se organizada da seguinte forma:

- No 0 é feita uma apresentação a cerca dos conceitos das redes inteligentes e gerenciamento de carga, através de uma revisão bibliográfica;
- No 0 discute-se o funcionamento do refrigerador para então propor um modelo que o represente com fidelidade. Vários parâmetros são levados em conta para a modelagem e esta é validada através de simulações que mostram o comportamento do modelo frente a variação dos diferentes

parâmetros. É proposto também um modelo agregado que será utilizado para análise do impacto do gerenciamento na rede elétrica;

- No Capítulo 4 são propostos métodos de gerenciamento para os refrigeradores. Analisa-se o comportamento de três lógicas de controle em grupo de refrigeradores para então escolher aquela que apresenta os melhores resultados, a qual é utilizada para analisar os impactos em um sistema elétrico;
- No Capítulo 5 observa-se o impacto do gerenciamento dos refrigeradores em um sistema elétrico. Isso é feito através de sucessivos fluxos de cargas em um sistema de 70 barras e analisando os resultados obtidos.
- O 6.1 Apêndice A apresenta, de forma sucinta, a teoria de transferência de calor presente em um refrigerador e que foi utilizada para a implementação do modelo.

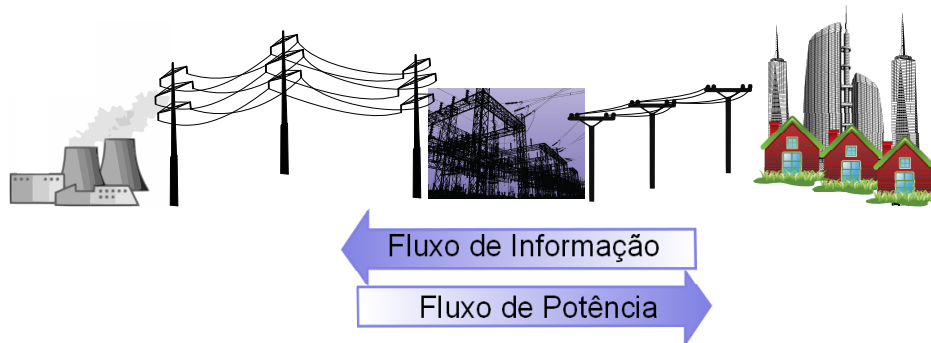
Toda a parte de modelagem e simulação do funcionamento dos refrigeradores foi feita no MATLAB®/Simulink® e os fluxos de cargas foram executados através do MatPower ([5]), um pacote do MATLAB®. Assim, todos os resultados discutidos a seguir foram obtidos através de simulações computacionais.



## Capítulo 2

# Redes Inteligentes, Gerenciamento de Carga e Medição Eletrônica

Com o passar dos anos, houve grande avanço tecnológico em todos os setores da indústria e embora o sistema elétrico tenha incorporado muita tecnologia, a arquitetura geral do sistema não sofreu grandes mudanças, assemelhando-se aos primeiros sistemas elétricos implementados a mais de um século ([1]). Ainda hoje o sistema elétrico é baseado num modelo verticalizado entre as unidades de geração, transmissão, distribuição e consumo ([2]), como mostrado na Figura 2.1, onde a potência flui da rede elétrica para os consumidores e a informação faz o caminho inverso.



**Figura 2.1 – Modelo atual do sistema elétrico ([3])**

Com o crescimento industrial houve uma maior demanda por energia elétrica. As concessionárias, além de atender essa demanda devem fornecer energia com a qualidade requerida pelos equipamentos cada vez mais sofisticados ([1]).

O aumento da demanda de energia faz com que as concessionárias operem seus sistemas cada vez mais próximos dos seus limites de capacidade e segurança ([6]) e cada vez há mais problemas relacionados à interrupção do fornecimento de energia. Para fazer frente a esses problemas, a abordagem adotada ainda é a tradicional: construção de novas usinas, expansão de linhas de transmissão e distribuição ([1]). Essa abordagem começa a

ser repensada, uma vez que demanda altos investimentos e provoca grandes impactos ambientais ([7]).

Com isso, o setor elétrico está se preparando para fazer uma transição em seu modelo e cada vez mais aumentam as discussões de como este será no futuro ([8],[4]). Surge então um modelo que pode auxiliar no atendimento das necessidades das concessionárias, dos consumidores e do meio ambiente: as redes inteligentes, trocando o modelo verticalizado por um descentralizado e interativo com todos os envolvidos ([8],[9]).

## **2.1 Redes Inteligentes**

As redes inteligentes constituem um novo modelo de rede elétrica, onde todas as entidades envolvidas no sistema elétrico, desde a geração até o consumidor terão participação em sua operação. Isso ocorrerá graças a um dos pilares desse novo tipo de rede: a comunicação bidirecional, ou seja, a informação fluirá tanto no sentido do sistema elétrico para os consumidores quanto o inverso ([10]).

Essa comunicação proporcionará a integração do consumidor à operação do sistema elétrico, o que ocorre hoje de forma passiva. Assim, as concessionárias de energia poderão adotar programas de gerenciamento de carga, que são modificações em suas curvas de carga, para obter benefícios em seu sistema, seja redução na demanda de energia no horário de pico, controle de tensão e frequência, dentre outros ([1]).

Porém, para participar desses programas, os consumidores também precisam ser beneficiados. O modo mais direto para isso é a adoção de tarifas variáveis ao longo do dia, em patamares ou em tempo real, podendo proporcionar economia financeira para aqueles consumidores que aderirem a esses programas.

### **2.1.1 Gerenciamento de carga**

Gerenciamento de carga pode ser definido como um conjunto de práticas que procuram incentivar os consumidores a mudar seus hábitos e por consequência promover mudanças na forma da curva de carga ([6]). Por exemplo, se uma concessionária deseja reduzir a demanda de energia nos momentos de maior carregamento, ela pode gerenciar

alguns equipamentos dos consumidores, como aquecedores, refrigeradores, iluminação, desligando-os durante o intervalo de tempo desejado ([11]).

### 2.1.1.1 Curvas de carga

Curva de carga é o registro no tempo, no período de um dia, da demanda de potência ativa de um grupo de consumidores ([12]). Seu estudo é de grande importância para o planejamento da operação do sistema elétrico, pois através dela é caracterizada a forma como os consumidores utilizam a energia. Os tipos de curvas de cargas são as seguintes ([13],[14],[15]):

- *Curva de Carga Residencial* – Seu formato típico é apresentado na Figura 2.2. É uma curva com crescimento ao longo do dia, sendo mais acentuado a partir das 17:00, que é quando as pessoas começam a retornar para casa após o trabalho e a escola. Apresenta pico por volta das 19:00, período em que há maior uso dos eletrodomésticos e principalmente dos chuveiros elétricos. Esse pico indica que o uso desses aparelhos é feito de forma simultânea por um grande número de pessoas. A curva de carga residencial é sensível às condições meteorológicas. Quando a temperatura é mais elevada há aumento do uso de aparelhos condicionadores de ar. Também é variável com eventos de interesse geral, como jogos importantes de futebol e capítulos finais de novela. Nestes casos, há queda brusca de consumo no início e aumento na demanda de energia no intervalo do jogo ou da novela;

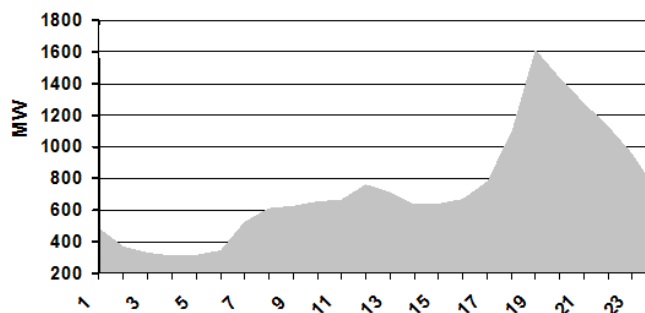


Figura 2.2 – Curva de carga residencial ([14])

- *Curva de Carga Comercial* – Seu formato é apresentado na Figura 2.3. Essa curva caracteriza-se por apresentar maior demanda de energia durante o horário comercial, com um ligeiro declínio na hora do almoço, também tendo seu comportamento afetado por eventos climáticos ou atípicos. Antes do horário comercial, a demanda desses consumidores deve-se basicamente à iluminação e a refrigeração. Após o horário comercial, há redução da demanda, devido ao fechamento dos estabelecimentos comerciais.

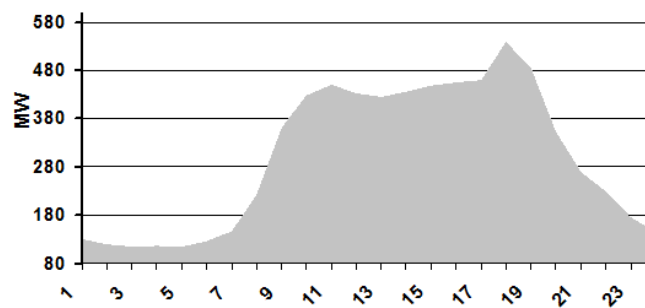


Figura 2.3 – Curva de carga comercial ([14])

- *Curva de Carga Industrial* – Seu formato é apresentado na Figura 2.4. Essa curva apresenta formato plano ao longo do dia, com redução da demanda no período de maior carregamento do sistema. Isso ocorre devido a tarifas mais elevadas nesse período para consumidores industriais. Assim, as indústrias reduzem o consumo ou então utilizam fontes de geração própria.

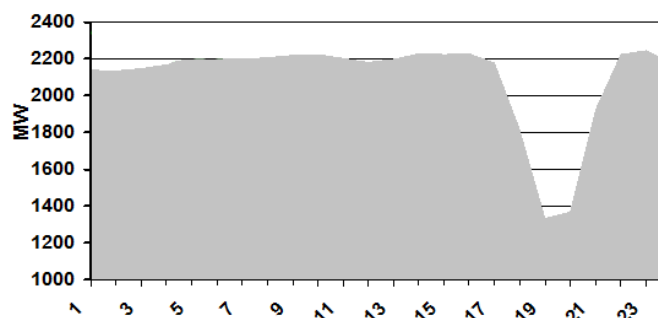
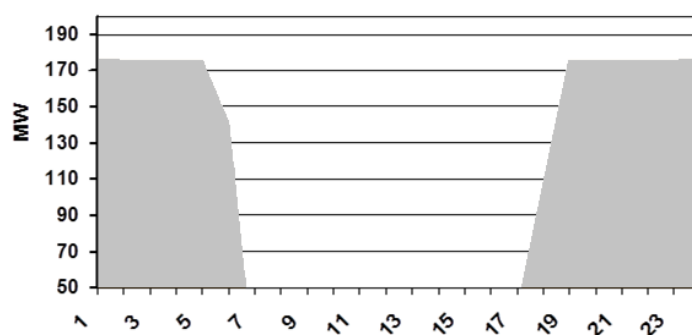


Figura 2.4 – Curva de carga industrial ([14])

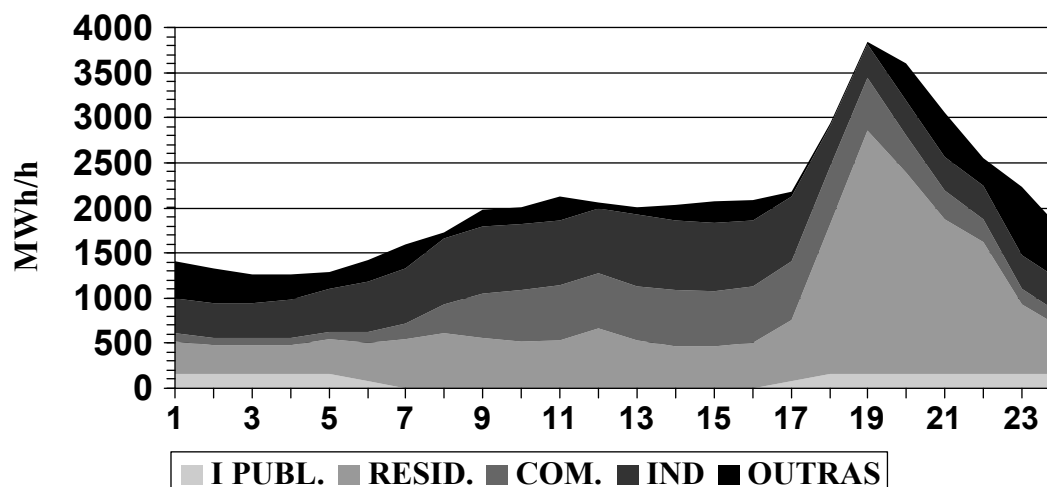


- *Curva de Carga de Iluminação Pública* – É apresentada na Figura 2.5. Caracteriza-se por não demandar energia durante o período diurno, quando há iluminação natural e demanda energia praticamente constante durante a noite e madrugada. É bastante influenciada pela adoção do horário de verão, já que se desloca o momento em que a iluminação pública é acionada, promovendo assim redução na demanda de energia no período de pico.



**Figura 2.5 – Curva de carga de iluminação pública ([14])**

Ao somar as curvas de carga, se obtém a curva apresentada na Figura 2.6, uma curva de carga típica, com a parcela de cada segmento consumidor. Essa curva apresenta pico de demanda por volta das 19:00.

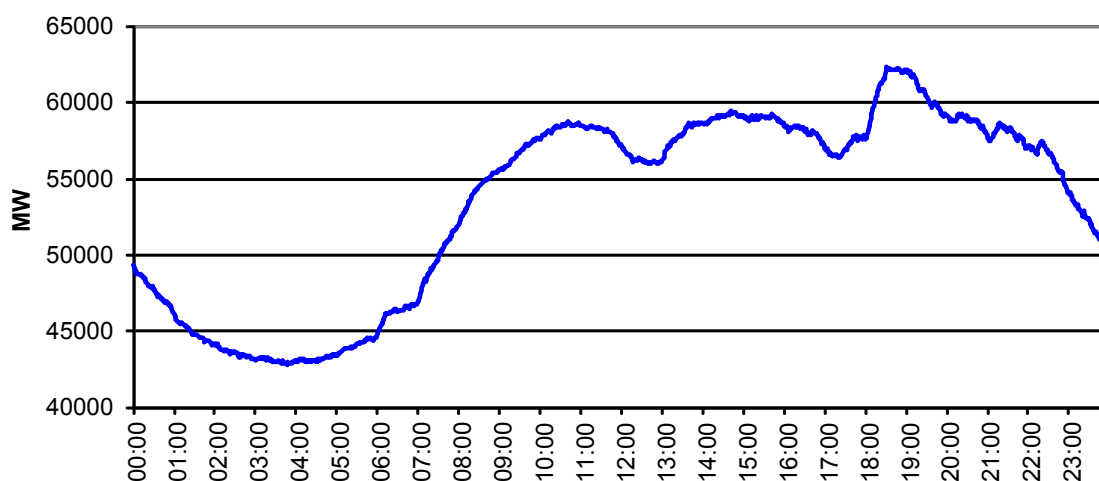


**Figura 2.6 – Curva de carga típica ([14])**

A Figura 2.7 apresenta a curva de carga do SIN no dia 21/09/2007 ([14]). O comportamento é semelhante ao da Figura 2.6, com pico de demanda por volta das 19:00. Como já foi dito, o gerenciamento de carga busca modificar a curva de carga e as técnicas utilizadas para isso serão apresentadas a seguir. Mas para que tais modificações sejam possíveis, a curva de carga deve possuir uma característica fundamental: a presença de vales.

Esses vales são importantes para a adoção de gerenciamento de carga, pois permitem que a energia que é consumida em momentos de pico seja transferida para esses períodos de menor carregamento do sistema elétrico. Assim, alguns equipamentos podem ser utilizados durante a madrugada, onde há a presença de um grande vale na curva de carga, ou mesmo em períodos antes do pico, quando há vales menores.

A idéia do gerenciamento de carga é deixar a curva de carga o mais plana possível, distribuindo o consumo de energia de forma mais igualitária ao longo do dia, aumentando a segurança do sistema e melhorando o planejamento da operação. Ressalta-se que os sistemas são projetados para suportar o pico e ainda mantendo certo grau de redundância. Existe, portanto, uma enorme infraestrutura ociosa durante a ocorrência dos vales da curva de carga. A seguir são apresentados os tipos mais comuns de gerenciamento de carga.



**Figura 2.7 – Curva de carga do SIN no dia 21/09/2007 ([14])**

### 2.1.1.2 Tipos de gerenciamento de carga

Existem alguns tipos de gerenciamento, mas os mais difundidos e aplicados são ([16]):

- *Corte do Pico (Peak Clipping)* – Mostrado na Figura 2.8 é a forma mais clássica de gerenciamento. Pode ser feito de duas formas: através de controle direto sobre os equipamentos dos consumidores, a concessionária desliga alguns destes, reduzindo o pico de demanda de energia ou através da adoção de tarifas mais elevadas no período de pico, desestimulando o consumo de energia por equipamentos que podem ser utilizados em momentos anteriores ou posteriores ao período de pico.

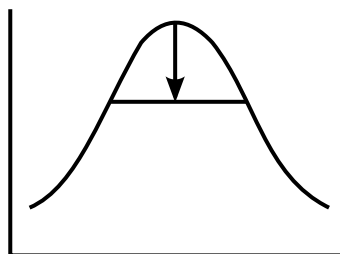


Figura 2.8 – Gerenciamento tipo redução do pico ([16]).

- *Enchimento dos Vales (Valley Filling)* – Mostrado na Figura 2.9 é outra forma clássica de gerenciamento de carga. Esse tipo é feito basicamente através de incentivos financeiros. Através de tarifas mais baratas, estimula-se o consumo de energia nos momentos em que o sistema não está com carga pesada, elevando assim os “vales” da curva de carga, tornando-a mais plana.

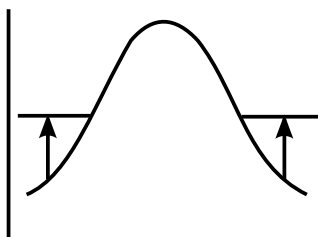
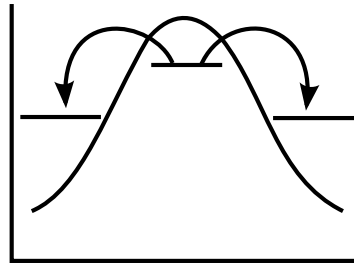


Figura 2.9 – Gerenciamento tipo enchimento dos vales ([16]).

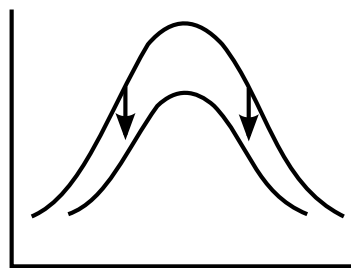
- *Deslocamento de Carga (Load Shifting)* – Mostrado na Figura 2.10, esse tipo de gerenciamento combina os dois anteriores. Estimula-se a re-

dução de consumo de energia no horário de pico, fazendo-o nos momentos em que o sistema apresenta carga mais leve. É feito através de incentivos financeiros, combinando tarifa elevada no horário de pico, desestimulando o consumo nesse momento, com tarifas mais baixas nos momentos de menor carregamento do sistema, estimulando assim a transferência de carga para esses horários.



**Figura 2.10 – Gerenciamento tipo deslocamento de carga ([16]).**

- *Conservação Estratégica (Strategic Conservation)* – Mostrado na Figura 2.11. Neste caso busca-se a redução de carga não só no horário de pico, mas durante todo o dia, promovendo uma redução em toda a curva de carga. Isso é feito através de programas que incentivem o usuário final a consumir energia de forma mais eficiente, substituição de equipamentos por mais novos, que sendo mais eficientes, consomem menos energia e também através da adoção de novas tecnologias.



**Figura 2.11 – Gerenciamento tipo conservação estratégica ([16]).**

### **2.1.1.3 Benefícios do gerenciamento de carga.**

Ao observar os tipos de gerenciamento de carga, pode-se concluir que o benefício principal proporcionado é o aumento da margem de segurança na operação do sistema elétrico, proporcionado pela redução do consumo de energia, seja através do desestímulo do

consumo no horário de pico, transferência do horário que a energia é consumida ou redução ao longo do dia inteiro. Mas o gerenciamento de carga também apresenta outros benefícios para o sistema elétrico ([17],[18]):

- *Recomposição do sistema após a ocorrência de faltas* – através do gerenciamento, cargas não prioritárias podem ter seu religamento postergado em detrimento das cargas prioritárias, fazendo com que durante a recomposição do sistema elétrico não haja sobrecarga, evitando a ocorrência de nova interrupção no fornecimento de energia;
- *Controle de tensão e frequência* – a oscilação da tensão e da frequência pode ser amenizada através do gerenciamento de carga. Por exemplo: quando há afundamento de tensão, cargas podem ser desligadas do sistema elétrico, permitindo que a tensão volte ao seu valor normal, o mesmo sendo válido para a frequência;
- *Integração de fontes renováveis* – algumas das fontes renováveis utilizadas para geração de energia, por exemplo, a eólica, apresentam comportamento intermitente, sendo suscetível a oscilações das fontes primárias. Essa oscilação da geração pode ser balanceada através da inserção ou retirada de carga do sistema.

#### **2.1.1.4 Implementação do gerenciamento de carga**

A implementação de programas de gerenciamento de carga não depende apenas da vontade das concessionárias, mas também dos consumidores. Para que estes participem, é necessário que também recebam vantagens que os incentivem.

Tais incentivos poderiam ser feitos de forma financeira, através de tarifas diferenciadas por horários ou em tempo real. Assim, torna-se desvantajoso para o consumidor utilizar seus equipamentos em certos momentos do dia, momentos esses em que a concessionária deseja diminuir a carga em sua rede e a tarifa for mais elevada e seja vantajoso utilizar quando a tarifa é mais barata ([19]).

De forma geral, a implementação pode ser feita das seguintes maneiras ([18]):

- *Tarifas mais baratas* – Em momentos pré-definidos a tarifa de energia é mais barata, normalmente quando o sistema opera em carga leve, como durante a noite, incentivando o uso de equipamentos nesses horários. Os equipamentos que podem ser encaixados nesse tipo são aquecedores de água, lava-roupas, lava-louça e outros;
- *Controle direto de carga* – A concessionária envia sinal direto para os equipamentos para serem ligados ou desligados de acordo com seu interesse. Utilizados em refrigeradores e aquecedores devido a sua inércia térmica;
- *Limitadores de carga* – Um limite de potência consumida pelo usuário. Seriam escolhidos equipamentos para serem desligados caso seu limite diário de consumo seja atingido;

Para que tudo isso seja possível, é necessária a implementação de uma interface inteligente, que possibilite a troca de informações, entre a concessionária e os consumidores. Através deste portal de comunicação é que o consumidor receberá informação do preço da energia, podendo escolher horários para uso de equipamentos e a concessionária enviará informações para o gerenciamento de equipamentos. A melhor maneira de se fazer isto é através dos medidores eletrônicos.

### **2.1.2 Medição eletrônica**

Fator primordial nas redes inteligentes, no Brasil a medição eletrônica é utilizada principalmente para grandes montantes de energia, sendo obrigatória para consumidores que comercializam energia no mercado livre e nas fronteiras dos sistemas elétricos ([20]).

Na parte residencial há somente projetos pilotos para estudos. Porém, vários países já começam a substituir a tecnologia de medição convencional pela eletrônica. Para que o mesmo ocorra em nosso país, é necessário que o assunto seja regulamentado pela ANEEL, que já iniciou estudos de viabilidade técnica e econômica para adoção de medição eletrônica em baixa tensão.

### 2.1.2.1 Característica do parque de medição brasileiro

Com o intuito de verificar a viabilidade de implantação de medição eletrônica, a ANEEL solicitou às concessionárias dados referentes aos medidores de energia em seus consumidores de baixa tensão, apresentados na Tabela 2.1 ([20]).

**Tabela 2.1 – Distribuição de frequência de idade dos medidores do parque nacional (%).**

<i>Idade (anos)</i>	<b>Norte</b>	<b>Nordeste</b>	<b>Centro-Oeste</b>	<b>Sudeste</b>	<b>Sul</b>	<b>Brasil</b>
<i>0 – 5</i>	52,58	30,89	29,28	28,90	22,69	29,86
<i>6 – 10</i>	28,94	25,34	25,34	18,58	16,67	21,05
<i>11 – 25</i>	4,22	13,70	18,59	12,46	13,41	12,98
<i>16 – 20</i>	3,98	6,63	7,77	8,57	12,15	8,31
<i>21 – 25</i>	3,04	6,49	5,17	8,06	12,42	7,82
<i>+ 25</i>	3,14	14,94	10,42	19,60	19,44	16,86
<i>Estoque</i>	4,11	2,02	3,43	3,83	2,22	3,12

Os dados da Tabela 2.1 indicam que os medidores brasileiros são relativamente novos. Isso significa que substituí-los pode trazer um alto custo ocioso (valor ainda não depreciado do ativo a ser retirado). A Tabela 2.2 mostra a distribuição dos tipos de medidores por região.

**Tabela 2.2 – Distribuição dos medidores por tipo (%).**

<b>Região Geográfica</b>	<b>Tipo de Medidor</b>	
	<i>Eletromecânico</i>	<i>Eletrônico</i>
<i>Norte</i>	79,09	20,91
<i>Nordeste</i>	88,27	11,73
<i>Centro-Oeste</i>	96,11	3,89
<i>Sudeste</i>	94,60	5,40
<i>Sul</i>	97,38	2,62
<i>Brasil</i>	92,61	7,39

Analisando-se a Tabela 2.2 observa-se que nas regiões onde o parque de medição é mais novo, a porcentagem de medidores eletrônicos é maior. De acordo com os dados que foram fornecidos pelas concessionárias, existem mais de 4,8 milhões de medidores eletrônicos no país, instalados ou em estoque ([20]).

### 2.1.2.2 Experiências internacionais com medição eletrônica

Como já foi dito, na Europa a medição eletrônica já está num estágio mais avançado, seja na instalação dos aparelhos ou na regulação. Nestes países foram adotadas funcionalidades que permitem o acesso direto as informações por parte dos clientes. Esta prática possibilita que cada segmento consumidor se encaixe na oferta comercial que julgue

mais adequada, além de permitir a adoção de gerenciamento de carga e também a redução dos custos operacionais para as concessionárias, através da eliminação da necessidade de leitura no local e também redução nas fraudes e furtos de energia ([20]).

Na Itália, 90% dos medidores de energia já são eletrônicos, tornando-a referência no assunto ([20]). Em 2003, a Suécia publicou uma lei determinando a medição horária de energia, o que tornou necessário a adoção de medidores eletrônicos. Em ensaios realizados em 2003 e 2004, durante o horário de ponta, mostrou que a leitura horária aliada com tarifas adequadas mudou os hábitos de consumo, ressaltando a importância desse tipo de medição ([20]).

Após as dificuldades enfrentadas no fornecimento de energia em 2003, o governo de Ontário (Canadá), estabeleceu uma meta de redução de 5% na demanda no horário de pico. Para isso, tornou-se relevante a adoção de medição eletrônica, permitindo a adoção de tarifas diferenciadas que permitissem a mudança dos hábitos de consumo durante o horário de pico ([20]).

### **2.1.2.3 Rede de transmissão de dados**

Para a transmissão bidirecional de dados, entre as concessionárias e os consumidores, há a necessidade de uma rede local de transmissão de dados, que transmita os dados dos medidores para os coletores regionais (estes são explicado a seguir). Dentre as opções possíveis para isso, destacam-se ([21]):

- *PLC (Power Line Communications)* – Esse modo de transmissão de dados utiliza a própria rede elétrica para a comunicação digital/analógica, transformando um ponto de energia também num ponto de rede de dados;
- *Fibra Óptica* – É um filamento flexível de vidro ou de material polimérico com a capacidade de transmitir luz, transportando grandes quantidades de informação. Por ser imune a interferências eletromagnéticas e ter baixa atenuação, possibilita que haja um grande espaçamento entre os repetidores;



- *GSM (Global System for Mobile Communications)* – É uma tecnologia móvel de transmissão sem fio na forma digital. Sua vantagem é o baixo custo de infra-estrutura;
- *GPRS (General Packet Radio Service)* – Tecnologia com grande taxa de transferência de dados. A vantagem desse modo de comunicação é o fato dela estar sempre conectada, possibilitando o envio e recebimento de dados sempre que necessário;
- *UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)* – Tecnologia de Terceira geração da telefonia celular (3G). Combina acesso móvel de alta velocidade com serviços baseados em Protocolos de Internet (IP);
- *SMS (Short Message Service)* – Padrão mundial na troca de mensagens curtas de texto. Disponível na tecnologia de telefonia móvel digital que permite o envio de mensagens entre equipamentos eletrônicos, possibilitando a comunicação entre o medidor e o sistema da distribuidora;
- *LAN (Local Area Network)* – Tecnologia utilizada para realizar a interconexão entre processadores para a troca de dados, ou seja, permite que computadores e outros equipamentos eletrônicos estabeleçam comunicação entre si, podendo compartilhar informações.

#### **2.1.2.4 Componentes necessários para adoção de medição eletrônica**

Além dos medidores, faz-se necessário o uso de outros equipamentos, que contribuirão para a adoção do sistema eletrônico de medição. Esses componentes podem ser divididos em ([21]):

- *Módulo de comunicação do medidor* – Responsável por transferir as informações do medidor para as vias de tráfego de dados;
- *Concentrador (Coletor Regional)* – É um dispositivo eletrônico que armazena dados dos módulos de comunicação e os transmite para o computador central, sendo o elo entre a rede local de transmissão de dados e a rede de longa distância;

- *Rede de longa distância* – São redes projetadas para transmitir os dados por uma longa distância geográfica. Transmitem os dados do coletor regional para o computador central. Os modos de transmissão mais comuns são a fibra óptica, a tecnologia de telefonia celular e rádio frequência;
- *Computador central* – É o ponto central de controle, análise e armazenamento dos dados de todo o sistema. Usualmente estão instalados nos centros de operações das concessionárias, fornecendo informações e indicadores sobre o sistema.

#### **2.1.2.5 Funcionalidades dos medidores eletrônicos**

Para que se justifique a troca dos medidores atuais por, é necessário que estes medidores tenham funcionalidades adicionais às presentes nos aparelhos atuais. Algumas funcionalidades possíveis de serem adotadas e os resultados esperados são ([20],[21]):

- *Medição de energia elétrica ativa* – Funcionalidade básica dos medidores sejam eles eletrônicos ou eletromecânicos;
- *Medição de energia nos 4 quadrantes* – Possibilidade de medição de energia nos dois sentidos: comprada e exportada. Essa funcionalidade faz-se necessária, pois cada vez mais há unidades consumidoras que possuem geração própria, com possibilidade de vender o excedente;
- *Medição de energia elétrica reativa* – Com essa funcionalidade busca-se incentivar o uso correto da rede, através da melhor utilização das instalações, redução das perdas elétricas e maior vida útil dos equipamentos, uma vez que o excesso de consumo de energia reativa deve ser evitado, já que ela “ocupa um espaço” no sistema que poderia ser utilizado para transmissão de energia ativa, além de exigir condutores de maior seção e transformadores de maior capacidade;
- *Demanda máxima* – Possibilidade de determinar a demanda máxima dos consumidores, otimizando o uso dos ativos das empresas, adequando a

potência contratada de cada consumidor à sua necessidade efetiva, promovendo o uso racional do sistema;

- *Tarifa horária* – Essa funcionalidade vai permitir a adoção de postos tarifários, referente a períodos de ponta e fora da ponta, além de outras possibilidades tarifárias, como tarifas variáveis ao longo do dia, dependendo do carregamento do sistema em cada instante;
- *Pré-pagamento* – Possibilidade da adoção de um sistema de pagamento semelhante ao feito na telefonia celular. O consumidor comprará antecipadamente uma quantidade pré-determinada de energia.
- *Registro de duração e quantidade de interrupções* – Registro desses indicadores de qualidade de serviço, servindo de instrumento de controle para os consumidores e para fiscalização da agência reguladora;
- *Registro do nível de tensão em regime permanente e do valor da frequência* – Registro desses indicadores de qualidade de energia, possibilitando que os consumidores e a agência reguladora tenham dados referentes sobre o nível de tensão entregue pelas concessionárias e dos valores de frequência;
- *Leitura remota* – Possibilidade da concessionária realizar a leitura do consumo de energia remotamente, sem a necessidade de deslocamento do profissional de leitura até as unidades consumidoras;
- *Controle de Carga* – Possibilidade das concessionárias realizarem gerenciamento de carga, permitindo maior flexibilidade operacional do sistema;
- *Corte e religamento remoto* – Realização à distância dessas atividades, possibilitando a atuação de forma mais rápida já que elimina a necessidade de deslocamento de uma equipe para esses serviços;
- *Alarme de demanda máxima atingida* – Aviso ao consumidor de que o limite máximo de demanda acordado com a concessionária está próximo

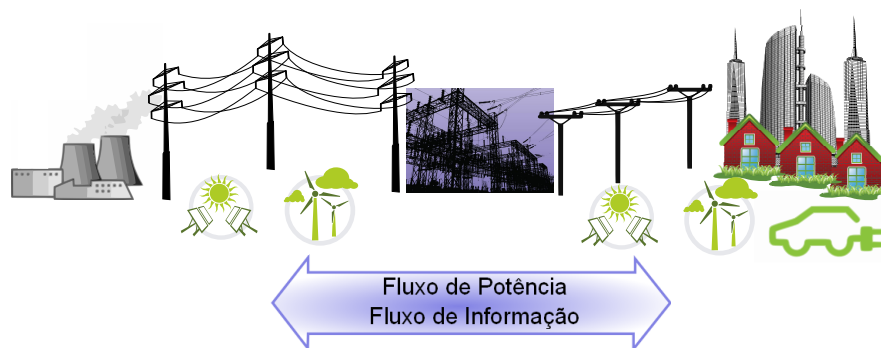
de ser atingido, de forma que ele possa tomar medidas em seu consumo e assim não pagar tarifa extra por extrapolar esse patamar;

- *Alarme de pouca energia disponível* – Esta funcionalidade refere-se aos casos de pré-pagamento de energia. Quando a quantidade de energia comprada está se aproximando do fim, o consumidor recebe um aviso, podendo assim se programar para comprar mais energia ou modificar seus hábitos de consumo.

Por tudo o que foi dito, os medidores eletrônicos tornam-se imprescindíveis quando se deseja obter uma rede elétrica mais inteligente, pois proporcionam grande quantidade de informações, possibilitando que novos serviços e acordos sejam oferecidos pelas empresas de energia.

### 2.1.3 Características e benefícios das Redes Inteligentes

As Redes Inteligentes terão por característica a presença de medidores eletrônicos em todas as unidades consumidoras, proporcionando assim uma comunicação bidirecional, alterando a topologia da rede atual, apresentada na Figura 2.1, para uma topologia onde a informação e a potência fluem nos dois sentidos ([4]), como mostrado na Figura 2.12, permitindo a inclusão de novas fontes de energia (solar, eólica e outras) e novas tecnologias (como carros elétricos).



**Figura 2.12 – Modelo de rede com adoção de Redes Inteligentes ([3]).**

Essa comunicação bidirecional e a medição eletrônica permitem que a concessionária tenha grande observabilidade sobre sua rede elétrica, monitorando índices e indicadores, prevendo e antecipando-se à ocorrência de falhas e caso estas ocorram, tomando

medidas para saná-las e restaurar o sistema elétrico do modo mais rápido, tendo também as seguintes características ([1],[2],[8]):

- *Medição e controle* – Grande número de sensores para monitoramento de parâmetros do sistema (tensão, frequência, corrente, potência), métodos de controle avançados coletando dados de todos os componentes da rede para análise através de algoritmos computacionais;
- *Capacidade de auto recuperação* – Com a vasta gama de informações sobre o estado de operação, o sistema elétrico será capaz de detectar problemas e responder rapidamente a estes, minimizando o impacto em outras partes do sistema e também para os consumidores;
- *Incorporação do consumidor* – Ao contrário do que ocorre hoje, onde os consumidores são desinformados sobre o que ocorre no sistema elétrico, as redes inteligentes proporcionarão que estes se integrem à operação do sistema, através do recebimento de mais informações e possibilidade de gerenciar seu consumo de energia;
- *Energia elétrica com maior qualidade* – Graças às informações sobre o sistema elétrico que estará disponível, ao gerenciamento de carga e a capacidade de auto recuperação, a energia elétrica será entregue para os consumidores com a qualidade requerida pelos modernos equipamentos, livres de afundamentos de tensão, distúrbios, oscilações e interrupções;
- *Acomodação de várias opções de geração* – Possibilidade de integrar ao sistema elétrico novas fontes de energia, como eólica, solar, célula combustível entre outras, tanto em grande escala, quanto em geração distribuída e pequenas unidades geradoras residenciais;
- *Eficiência* – Capacidade da concessionária atender a demanda de energia sem a construção de nova infraestrutura. Isso será possível através da adoção de tarifas variáveis, que farão com que os consumidores adotem programas de gerenciamento de carga, consumindo energia de forma mais eficiente e racional;

Essas características fazem com que as redes inteligentes proporcionem benefícios não só para as concessionárias, mas para os consumidores e o meio ambiente, dentre os quais([2],[22],[23]):

- *Planejamento* – Com o grande número de dados e informação disponíveis, as concessionárias podem realizar um melhor planejamento operacional e de gestão de seus ativos;
- *Segurança* – Sistema elétrico mais seguro, com menor probabilidade de ocorrência de apagões e menor impacto caso ocorra alguma falha;
- *Economia* – A disponibilidade de oferecimento de tarifas variáveis permite que o consumidor escolha os horários que deseja utilizar seus equipamentos podendo economizar na conta de energia;
- *Melhor utilização da rede* – Programas de gerenciamento de carga proporcionarão melhor uso da rede, uma vez que a energia será utilizada de forma mais eficiente e responsável;
- *Ambiental* – A integração de novas fontes de geração junto com a redução do consumo de energia graças ao uso mais responsável promoverá redução da geração de energia que utilize fontes que degradem o meio ambiente e também proporcionarão redução na emissão de CO<sub>2</sub>;
- *Pesquisa* – Por incorporar novas tecnologias e conceitos, surge a necessidade de grande quantidade de pesquisas e estudos para sua implantação;

De forma resumida, pode-se dizer que as redes inteligentes podem ser descritas por 3I's: *Informação*, já que o sistema terá a capacidade de comunicar com todos os dispositivos da rede elétrica, *Interação*, pois terá a capacidade de controlar e regular toda a infraestrutura da rede, de geradores a consumidores e *Integração*, possibilitando a inserção de novos equipamentos na operação do sistema elétrico ([24]).

## **2.2 Comentários Finais**

Neste capítulo foram apresentados os conceitos e idéias encontradas na literatura a respeito das redes inteligentes, bem como de gerenciamento de carga e medição eletrônica, que são fatores fundamentais para a implementação desse tipo de rede elétrica. Pode-se notar que as redes inteligentes representam uma das grandes apostas de como será a rede elétrica no futuro, tanto que esse tema vem recebendo grande atenção de universidades e institutos de pesquisa, bem como altos investimentos dos governos.

Este capítulo também é importante para criar o contexto em que se insere a presente pesquisa, que propõe o gerenciamento de refrigeradores residenciais para a redução do consumo em horários de pico. Trata-se do estudo de um provável cenário futuro, onde se assume que existem canais de comunicação entre consumidores e rede elétrica e que os meios de incentivo ao gerenciamento de carga já foram estabelecidos. Através deste exercício, eventuais desvantagens e vantagens qualitativas e quantitativas da presente proposta podem ser avaliadas, resultando em subsídios técnicos para a implantação ou não das redes inteligentes.





## Capítulo 3

# Modelo do Refrigerador

Para a análise dos impactos e benefícios que o gerenciamento de refrigeradores pode proporcionar ao sistema elétrico, é necessário definir um modelo que descreva o seu funcionamento. Para isso, adotou-se um modelo que contemple sua dinâmica térmica. A explicação sobre os conceitos e princípios de transferência de calor presentes no refrigerador são discutidos no Apêndice A. Assim, neste capítulo será desenvolvido um modelo para o refrigerador com base na teoria presente nesse apêndice. A implementação do modelo deu-se através do MATLAB®/Simulink®.

### 3.1 O Refrigerador no Brasil

No Brasil o refrigerador é um dos equipamentos mais presente nas residências. De acordo com a Pesquisa Nacional por Amostras de Domicílios (PNAD), há refrigeradores em 92,1% das residências brasileiras, ou seja, 52.989.000 residências possuem esse aparelho ([26]).

Um refrigerador de 130W, consome em média 55 kWh por mês ([27]). Se for considerado que em cada residência tem ao menos um aparelho desse tipo, o consumo total de energia devido aos refrigeradores é de 2.914 GWh por mês. Isso corresponde a 31% do consumo residencial e 8,2% do consumo total de energia no mês de fevereiro de 2011 ([28]).

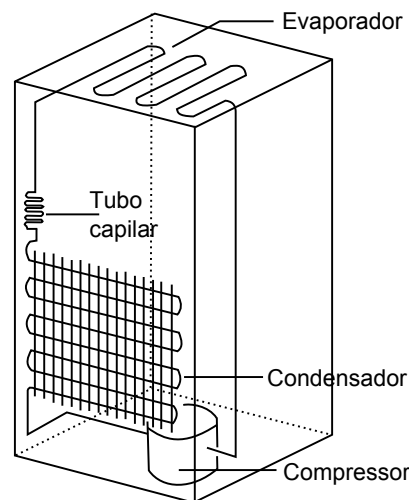
Esses dados demonstram que além de potencial técnico (possibilidade de ser ligado e desligado) para o gerenciamento, o refrigerador possui potencial energético e a vantagem de ser um equipamento que é usado em grande parte das residências.

## 3.2 Funcionamento do Refrigerador

Primeiramente, antes de desenvolver o modelo do refrigerador, faz-se necessário uma breve explicação sobre seu funcionamento. Seu principal uso é para a conservação de alimentos, diminuindo ou cessando as atividades de bactérias através da diminuição da temperatura ([29]). Seu funcionamento pode ser simplificado e resumido em: retirar o calor de seu interior e despejá-lo no ambiente externo, através de fluidos refrigerante e trocadores de calor. A Figura 3.1 servirá para explicar o processo de refrigeração.

No interior dos componentes do refrigerador, circula o fluido refrigerante. Ele é forçado a percorrer todo o circuito tubular efetuando a troca de calor entre o interior do refrigerador e o ambiente externo. Deve possuir algumas características para que isso seja possível, tais como: baixa temperatura de vaporização e baixa pressão na temperatura ambiente para que possa passar do estado gasoso para líquido.

O fluido passa no evaporador, onde absorve o calor presente no interior do refrigerador passando do estado líquido para o estado gasoso. O compressor funciona como uma bomba de sucção, retirando o fluido do evaporador, abaixando sua pressão e transportando-o para o condensador.



**Figura 3.1 – Esquemático do refrigerador.**

O controle do processo de refrigeração é feito pelo termostato do aparelho. Nele define-se a temperatura na qual o compressor será ligado dando início ao processo de refrigeração e abaixamento da temperatura interior.

### 3.3 Dados do Refrigerador

Para a elaboração do modelo e posteriores simulações, utilizou-se as características de um modelo existente no mercado ([30]). Alguns dados que não estavam presentes no manual foram obtidos em artigos científicos ([31]), sendo que os principais são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Dados do refrigerador.

<i>Altura do compartimento congelador</i>	0,400 m
<i>Largura do refrigerador</i>	0,695 m
<i>Comprimento do refrigerador</i>	0,620 m
<i>Potência do refrigerador</i>	146 W
<i>Espessura da parede</i>	0,040 m
<i>Material isolante</i>	Poliuretano
<i>Condutividade térmica do material isolante</i>	0,027 W/m°C

### 3.4 Modelo do Refrigerador

No modelo proposto para o refrigerador, foi considerado sua dinâmica térmica, ou seja, a variação da temperatura em seu interior devido a abertura de porta, inserção de alimentos e a troca de calor com o ambiente externo. Buscou-se um modelo que fosse simples, mas que ao mesmo tempo fosse fiel ao seu funcionamento. Dentre os modelos existentes na literatura o que foi adotado é o representado pela equação (3.1) ([32]).

$$C \frac{dT}{dt} + G(T - T_a) - P_{dist} = -wP \quad (3.1)$$

Neste modelo,  $C$  refere-se ao calor específico do ar no interior do refrigerador,  $G$  é a condutividade térmica do ar interior,  $T$  a temperatura do ar interior,  $T_a$  a temperatura ambiente,  $P_{dist}$  refere-se a distúrbios como abertura de porta e inserção de alimentos,  $w$  representa o funcionamento do refrigerador, valendo 1 quando está ligado e 0 quando está desligado e  $P$  é a potência de refrigeração.

### 3.4.1 Cálculo da Condutividade Térmica do Ar (G)

A condutividade térmica do ar é o inverso da resistência térmica, conforme pode ser visto no 6.1 Apêndice A. As resistências térmicas de condução e de convecção valem respectivamente:

$$R_k = \frac{L}{Ak} \quad (3.2)$$

$$R_c = \frac{1}{h_c A} \quad (3.3)$$

A resistência térmica de condução da parede do refrigerador permanece constante, o mesmo ocorrendo com a resistência térmica de convecção externa, cujo valor de  $h_c$  utilizado foi de 10 W/m<sup>2</sup> °C ([31]). Para o cálculo da resistência de convecção interna levou-se em conta a influência da temperatura. Para seu cálculo é necessário encontrar uma expressão para o coeficiente de convecção interno que seja variável com a temperatura. Isso é obtido da seguinte forma ([31]):

Para o interior do *freezer* vale a relação da equação (3.4), onde  $Nu$  é o número de Nusselt e  $Ra$  é o número de Rayleigh:

$$Nu = 0,59 Ra^{0,25} \quad (3.4)$$

O número de Nusselt é obtido pela equação (3.5), onde  $h_{int}$  é o coeficiente de convecção interno (W/m<sup>2</sup>K),  $H$  é a altura do freezer (m) e  $k$  é a condutividade térmica do ar (W/m°C).

$$Nu = \frac{h_{int} \cdot H}{k} \quad (3.5)$$

Substituindo-se a equação (3.4) na equação (3.5) obtém-se a expressão para o coeficiente de convecção interno:

$$h_{int} = \frac{0,59 Ra^{0,25} k}{H} \quad (3.6)$$

O número de Rayleigh é dado pela equação (3.7), sendo  $g$  a aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>),  $\Delta T$  a diferença de temperatura (K) entre o interior e o exterior do freezer,

$\beta$  o coeficiente de expansão térmica do ar ( $K^{-1}$ ),  $l$  a largura do freezer (m),  $\nu$  a viscosidade cinética do ar ( $m^2/s$ ) e  $\alpha$  a difusividade térmica do ar ( $m^2/s$ ), dada pela equação (3.8).

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T l^3}{\alpha\nu} \quad (3.7)$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (3.8)$$

Na equação (3.8),  $k$  é a condutividade térmica do ar (W/mK),  $\rho$  é a densidade do ar ( $kg/m^3$ ) e  $c_p$  é o calor específico do ar (J/kg K). Todos os parâmetros que representam propriedades do ar foram considerados como sendo variável com a temperatura, obtendo-se assim o coeficiente de convecção interno e consequentemente a resistência de convecção interna variável com a temperatura.

Seguindo o procedimento da seção A.3 do Apêndice A, calcula-se as resistências térmicas de cada parede do refrigerador e consequentemente a resistência térmica total, obtendo-se então o coeficiente  $G$  da equação (3.1).

### 3.4.2 Temperaturas de Funcionamento

As temperaturas limites de funcionamento do refrigerador são aquelas nas quais o refrigerador é desligado ou ligado. Quando a temperatura no interior do refrigerador atinge um limite máximo ( $T_{máx}$ ) o refrigerador é ligado e permanece assim até que a temperatura interna atinja um valor mínimo ( $T_{min}$ ), quando é desligado, repetindo o ciclo de funcionamento. Esse comportamento está presente na equação (3.1) através da variável  $w$ .

Em ([33]) foi obtido o histórico da temperatura interna em vários pontos de um refrigerador. Na implementação do modelo proposto, foi utilizada a temperatura obtida no topo do refrigerador. Ela varia de aproximadamente  $-16^\circ C$  a  $-20^\circ C$  com média de  $-18^\circ C$ .

A temperatura interna inicial do refrigerador foi obtida de modo aleatório numa faixa entre  $-16^\circ C$  e  $-20^\circ C$  com probabilidade igual de ocorrência para qualquer valor.

### 3.4.3 Temperatura Ambiente

A temperatura ambiente tem influência no funcionamento do refrigerador, já que no momento em que a diferença de temperatura entre o interior e o exterior é maior

(período mais quente) há maior troca de calor entre o interior e o exterior do refrigerador, fazendo com que o compressor seja ligado mais vezes, acarretando em maior tempo de funcionamento e consumo de energia. O inverso ocorre quando a diferença de temperatura entre o interior e o exterior é menor (período mais frio).

Ao longo de um dia pode ocorrer variações consideráveis de temperaturas, com temperatura mais baixas durante a madrugada e mais elevadas a tarde, por exemplo atingindo a máxima de 31°C as 15:00 e a mínima de 20°C as 07:00 no dia 28/12/2010 em Campinas – SP ([34]), sendo necessário levar em conta essa variação de temperatura.

Isso foi feito através do termo ( $T_a$ ) da equação (3.1) e no modelo foi implementada de acordo com informações obtidas durante um dia em Campinas – SP, de acordo com o mostrado na Figura 3.2.

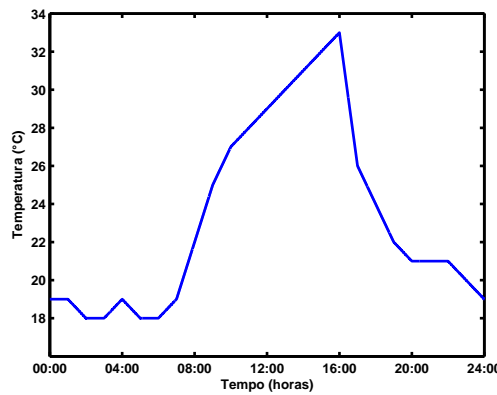


Figura 3.2 – Temperatura ambiente ao longo de um dia ([34])

### 3.4.4 Abertura de Portas

A abertura da porta do refrigerador é outro fator que influencia seu funcionamento. Quando esse evento ocorre o ar quente do ambiente entra no refrigerador que perde ar frio. Quando a porta é fechada há elevação da temperatura do ar interior, fazendo com que o refrigerador seja ligado caso a porta fique aberta muito tempo e a temperatura ultrapasse o valor de  $T_{máx}$  ou atinja esse valor mais rapidamente, sendo ligado para resfriar o ar interior, provocando aumento no consumo de energia.

Alguns trabalhos ([35],[36],[37]) mediram o efeito da abertura de porta no consumo do refrigerador. Para inclusão desse distúrbio no modelo foi utilizado o resultado

obtido em ([38]) que obteve um aumento de 10Wh no consumo de energia a cada abertura de porta.

Assim, o distúrbio proporcionado por uma abertura de porta foi representado através de uma potência constante de 20W durante 30 minutos através do termo  $P_{dist}$  na equação (3.1). Definiu-se que ao longo de um dia, ocorreria uma quantidade de abertura variável entre 3 e 10, sorteada aleatoriamente, tendo cada número chances iguais de ocorrência. O instante em que a porta é aberta também foi sorteado aleatoriamente, porém com maior probabilidade de incidência nos períodos do almoço e do jantar, quando o uso do refrigerador é maior.

### 3.4.5 Inserção de Alimentos

Outro fator que influencia o funcionamento de um refrigerador é a inserção de alimentos em seu interior. Alimentos com temperatura superior a interior do refrigerador, provocam um aumento de temperatura e, conseqüentemente, mais tempo de funcionamento e consumo de energia.

Esse distúrbio, assim como a abertura de porta, é representado pelo termo  $P_{dist}$  na equação (3.1). Para simplificar, foi considerado como uma potência constante, durante 4:30 horas, necessária para levar o alimento (no caso foi utilizado água) da temperatura ambiente (considerada como 25 °C) até a temperatura média do interior do refrigerador (-18°C). A quantidade de água considerada em cada ocorrência ficou entre 0,5L e 1,0L, assim os valores de potência utilizados ficaram entre 15W e 29W, conforme explicado a seguir.

Dados: calor específico da água = 1 cal/g°C, calor específico do gelo = 0,5 cal/g°C, calor latente da água = 80 cal/g, 1 cal = 4,2J e 1L e água = 1kg.

A quantidade de calor necessária para resfriar a água de 25°C a 0°C ( $Q_1$ ), calor latente ( $Q_2$ ) e para resfriar o gelo de 0°C a -18°C ( $Q_3$ ) são (para 0,5 L. Para 1 L o procedimento é semelhante):

$$Q_1 = mc\Delta T = 500 \cdot 25 = 12500cal \quad (3.9)$$

$$Q_2 = mL = 500 \cdot 80 = 40000cal \quad (3.10)$$

$$Q_3 = mc\Delta T = 500 \cdot 18 = 4500 \text{ cal} \quad (3.11)$$

A quantidade de calor total necessária vale 57000 cal, o equivalente a 239400J. A potência necessária será:

$$P = \frac{E}{\Delta t} = \frac{239400}{270 \cdot 60} = 14,8 \text{ W} \quad (3.12)$$

Os valores de potência foram sorteados aleatoriamente entre 15W e 30W, com probabilidade igual de ocorrência e o instante em que ocorriam também foi sorteado porém com maior probabilidade de ocorrência nos horários de almoço e jantar.

### 3.5 Validação do Modelo

A Figura 3.3 apresenta a visão geral do modelo implementado no *Simulink*.

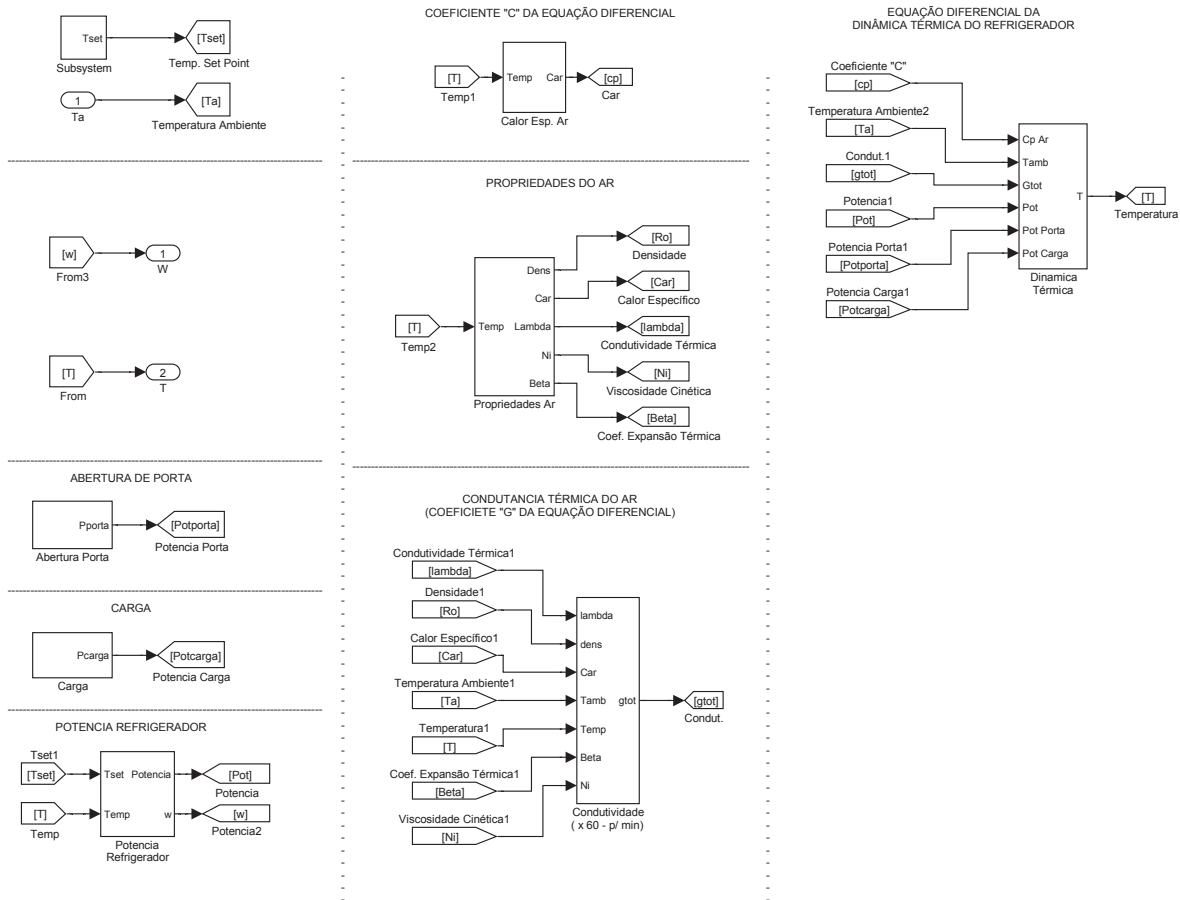


Figura 3.3 – Modelo do refrigerador implementado no Simulink.



Para inicializar a simulação, foi criado um *script* no Matlab contendo as informações do refrigerador e os parâmetros de simulação, como a temperatura inicial e os dados referentes a aberturas de porta e inserção de alimentos (valor de potência e instante de ocorrência do evento). A simulação foi feita para o período de 1 dia com passo de integração de 0,1 minutos. Inicialmente, para verificar o comportamento do modelo, a temperatura ambiente foi mantida constante em 25°C. O resultado é apresentado na Figura 3.4 e na Tabela 3.2.

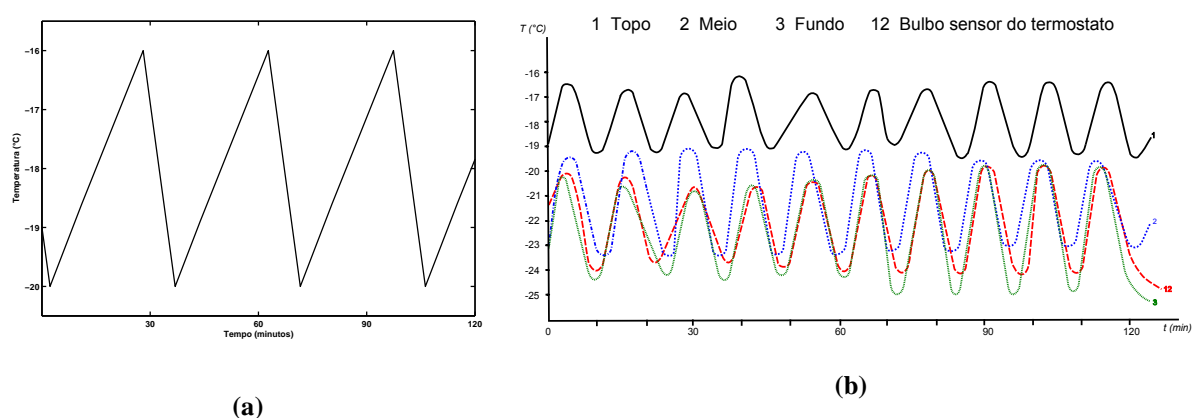


Figura 3.4 – Temperatura interna do refrigerador durante as 2 primeiras horas do dia (a) comparado com temperaturas obtidas através de medições (b) ([33]).

Tabela 3.2 - Dados do funcionamento de um refrigerador.

<i>Tempo de Funcionamento durante 1 dia</i>	6,09 horas
<i>Consumo diário</i>	0,889 kWh
<i>Consumo mensal*</i>	26,67 kWh
<i>Duração ciclo ON</i>	8,8 minutos
<i>Duração ciclo OFF</i>	28,8 minutos

\* O consumo mensal foi obtido multiplicando o consumo diário por 30.

Primeiramente, ao observar a Figura 3.4 (a) percebe-se que o comportamento da temperatura interna do ar ficou dentro do esperado, variando entre -16°C e -20°C, conforme em (b) para o topo do refrigerador ([33]). É mostrado o resultado durante as duas

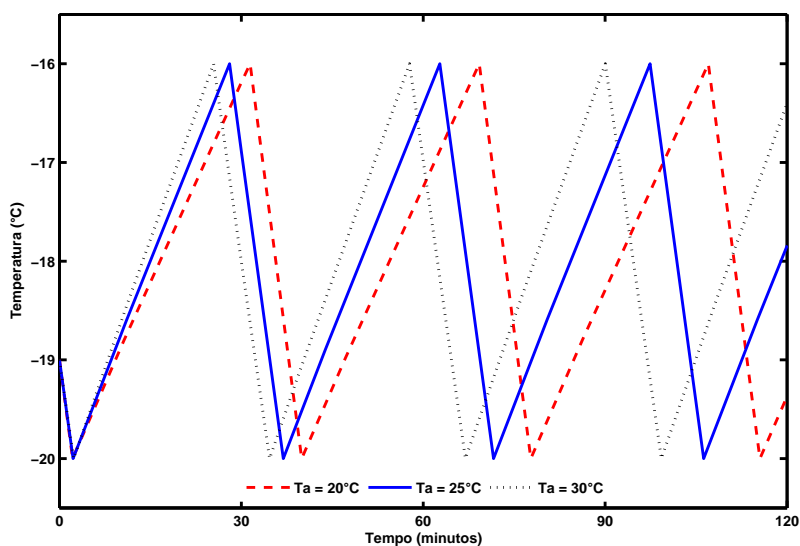
primeiras horas do dia para melhor visualização do resultado, sendo que o comportamento permanece o mesmo ao longo do dia.

O baixo tempo de funcionamento diário e consumo apresentados na Tabela 3.2 são explicados pelos seguintes fatos:

- Inexistência de abertura de porta;
- Inexistência de inserção de alimentos;
- Temperatura ambiente constante;

Esse conjunto de fatores faz com que não haja elevação da temperatura do ar interno do refrigerador proveniente de distúrbios externos. O funcionamento do refrigerador deve-se apenas a elevação de temperatura devido à transferência de calor entre o ambiente externo e o interior do refrigerador.

Para analisar o efeito da temperatura ambiente no funcionamento do refrigerador, foram realizadas simulações para três valores de  $T_a$ , mantidos constantes ao longo do dia. Esta influência pode ser observada na Figura 3.5 e na Tabela 3.3.



**Figura 3.5 – Influência da temperatura ambiente no funcionamento do refrigerador.**

Os resultados mostram a influência da temperatura ambiente no funcionamento do refrigerador. Quanto maior  $T_a$ , maior será a diferença entre a temperatura ( $\Delta T$ ) externa e a interna e maior o fluxo de calor através de condução e convecção entre os ambientes,

fazendo com que o interior do refrigerador aqueça-se mais rapidamente, fato que pode ser observado pela duração do ciclo *off* do refrigerador (intervalo de tempo em que o refrigerador permanece desligado): enquanto a 20°C ele dura 29,3 minutos, a 30°C esse tempo cai para 23,1 minutos, fazendo com que o refrigerador consuma mais energia elétrica durante o dia.

**Tabela 3.3 - Dados de funcionamento do refrigerador para diferentes temperaturas ambiente.**

$T_a = 20^{\circ}\text{C}$	$T_a = 25^{\circ}\text{C}$	$T_a = 30^{\circ}\text{C}$
<b><i>Tempo de funcionamento diário (horas)</i></b>		
5,4	6,1	6,8
<b><i>Consumo diário (kWh)</i></b>		
0,792	0,889	0,994
<b><i>Consumo mensal (kWh)</i></b>		
23,76	26,67	29,82
<b><i>Duração Ciclo ON (minutos)</i></b>		
8,5	8,9	9,3
<b><i>Duração Ciclo OFF (minutos)</i></b>		
29,3	25,8	23,1

As Figura 3.6 e Figura 3.7 apresentam o comportamento do refrigerador devido a influência da abertura de portas e inserção de alimentos, ambos os casos para eventos ao longo de um dia. Analisando-as pode-se notar um comportamento que já era esperado: quanto o maior o número de abertura de portas, mais tempo o refrigerador permanece funcionando e maior o seu consumo, já que a quantidade de vezes em que há a troca do ar frio interior com o ar quente exterior é maior; quanto maior a quantidade de vezes que alimentos são inseridos, mais tempo funcionando e maior o consumo, já que o refrigerador necessitará funcionar mais vezes para poder resfriar o alimento e o ar aquecido por ele.

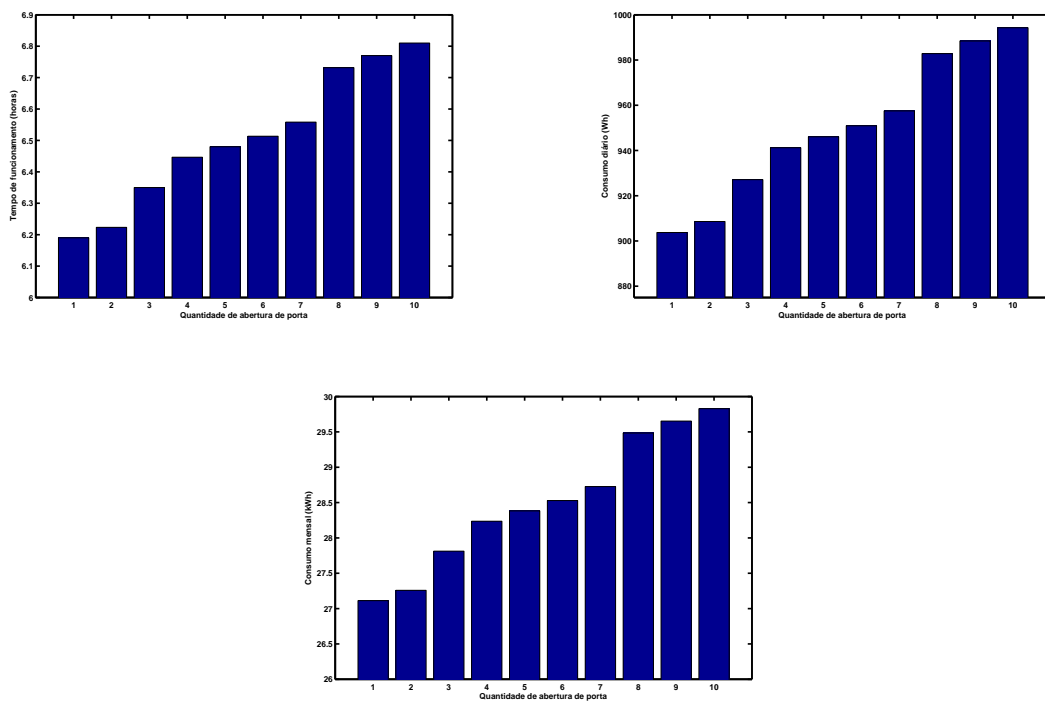


Figura 3.6 – Influência da abertura de porta no funcionamento do refrigerador.

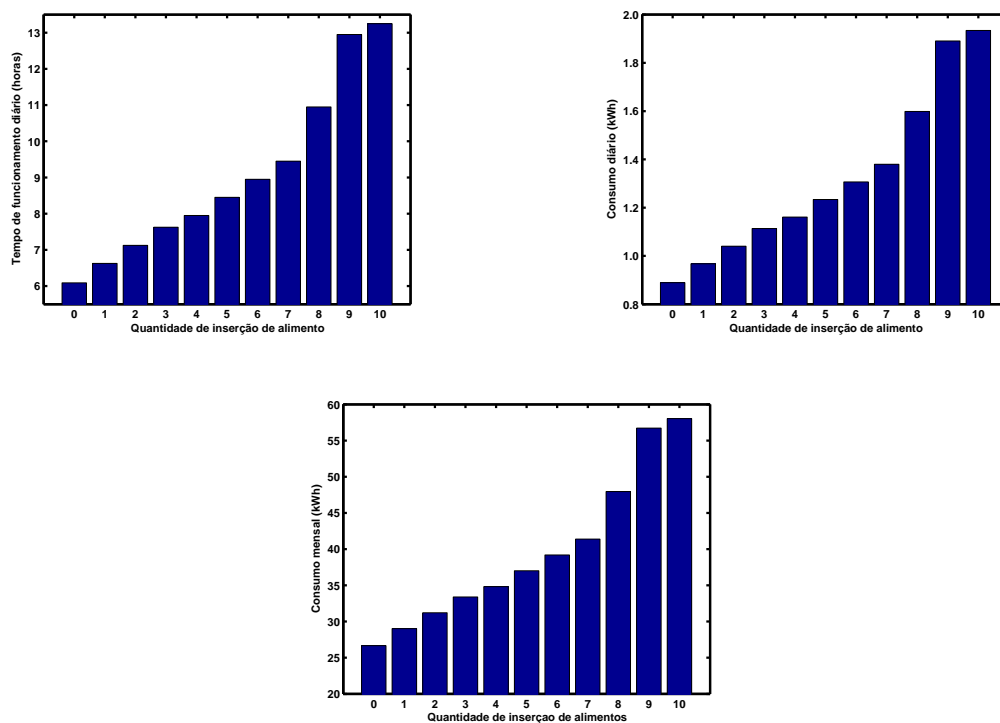
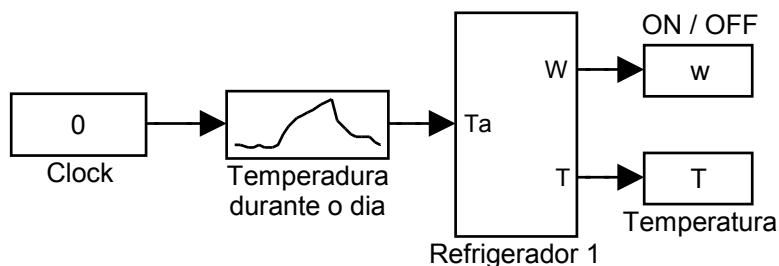


Figura 3.7 – Influência quantidade de inserção de alimentos no funcionamento do refrigerador.

Com o modelo tendo comportamento conforme o esperado para todos os parâmetros, criou-se um bloco no *Simulink*, mostrado na Figura 3.8, que serviu como base para um modelo agregado.

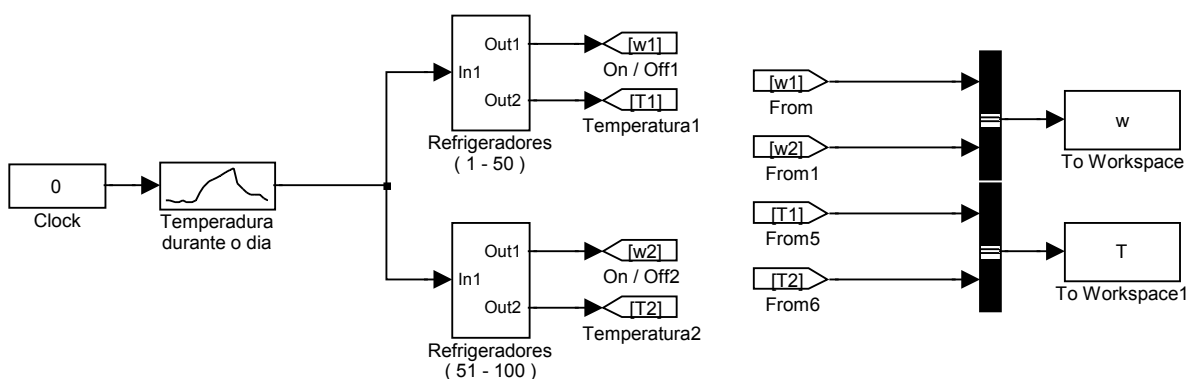


**Figura 3.8 – Bloco criado para o modelo de um refrigerador.**

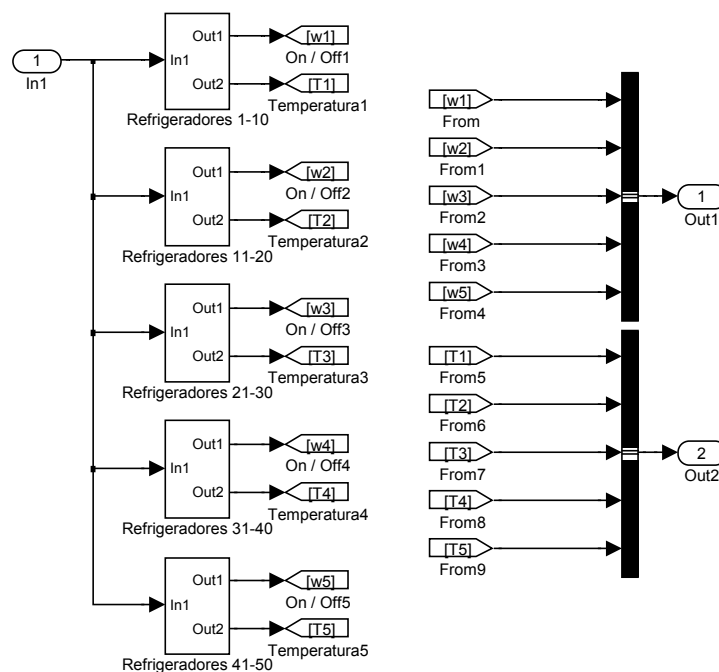
Nesse esquema, o bloco ‘*refrigerador 1*’ engloba todo o modelo representado na Figura 3.3, com a temperatura  $T$  e o ciclo de funcionamento  $w$  como saídas para análise e um *clock* para a definição da temperatura ambiente a cada passo de integração.

### 3.6 Modelo Agregado

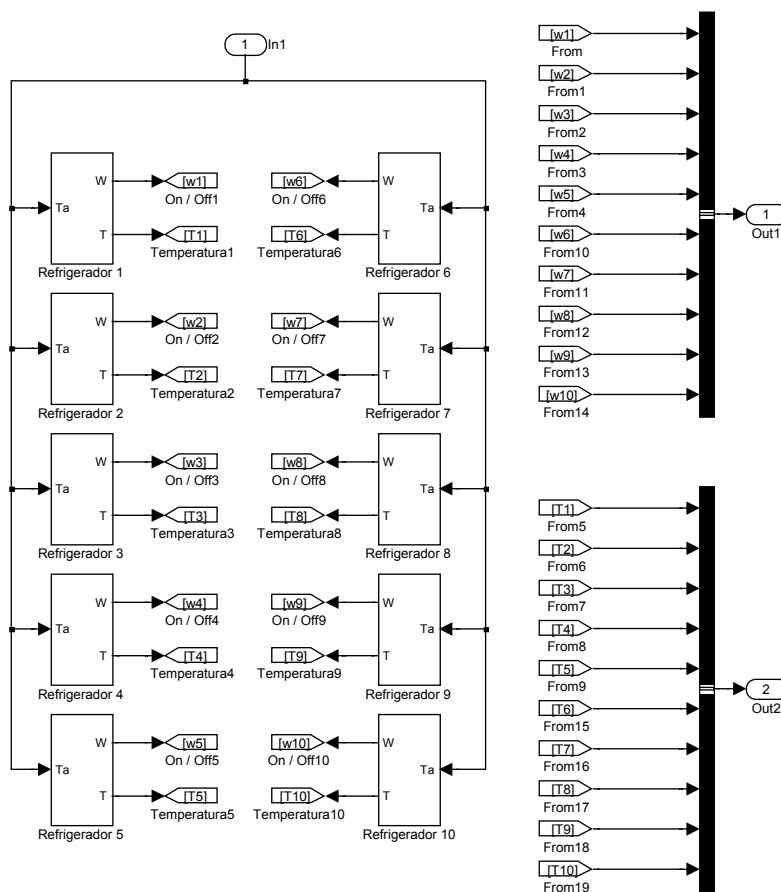
Para analisar o impacto que o gerenciamento de refrigeradores podem ter em um sistema elétrico, é necessário que tenhamos o comportamento de um grupo de refrigeradores que estão presentes em cada barra do sistema. Para isso, utilizando o modelo unitário como base, criou-se um modelo agrupado de refrigeradores, contendo 100 deles, que serviu de base para simulação de outras quantidades. Da Figura 3.9 à Figura 3.11 mostra-se o modelo de 100 refrigeradores agregados.



**Figura 3.9 – Esquema do modelo de 100 refrigeradores.**



**Figura 3.10 – Diagrama interior do modelo de 100 refrigeradores.**



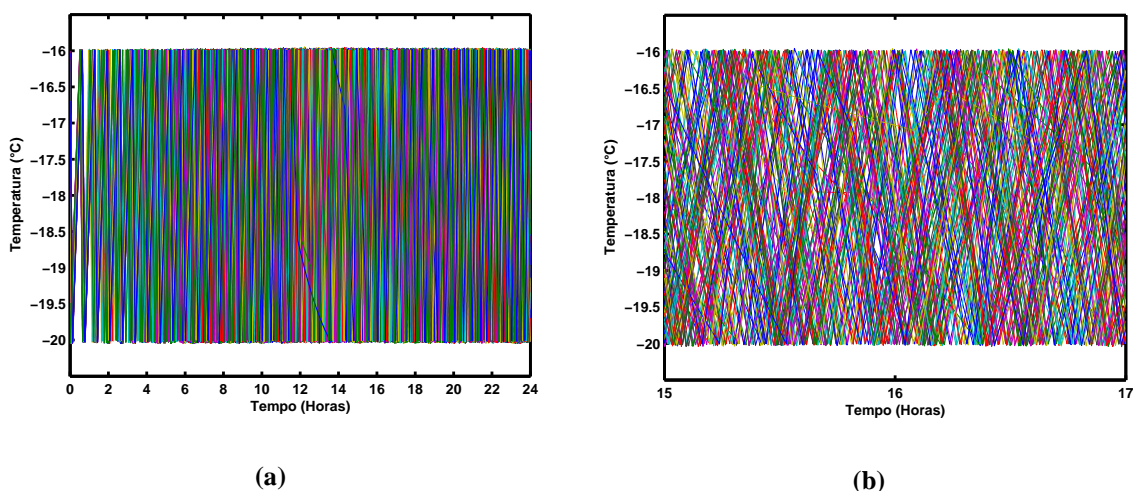
**Figura 3.11 – Conjunto de refrigeradores unitários formando parte do modelo de 100 refrigeradores.**

Na Figura 3.9 mostra-se que o modelo de 100 refrigeradores é formado por dois grupos de 50, que por sua vez é formado por grupos de 10 refrigeradores, composto de 10 blocos de refrigeradores unitários.

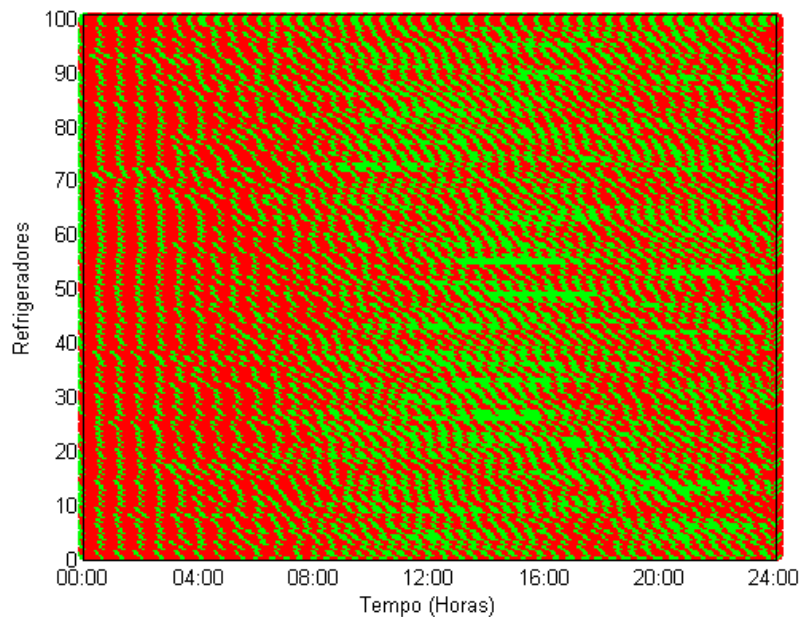
O modelo agrupado apresenta esquema de simulação semelhante ao modelo unitário: inicialmente um *script* do Matlab é rodado, definindo os parâmetros dos refrigeradores, sorteando suas temperaturas iniciais, a quantidade de abertura de porta e de inserção de alimentos que cada refrigerador irá sofrer ao longo do dia bem como em que momento isso vai ocorrer.

A Figura 3.12 mostra a temperatura interna de cada um dos 100 refrigeradores, enquanto a Figura 3.13 mostra o funcionamento de cada um, onde cada linha representa um refrigerador e um ponto vermelho indica que ele estava desligado enquanto um verde indica que estava ligado.

Pela Figura 3.13 pode-se notar que no início os refrigeradores estão funcionando em sincronismo. Isso é resultante do início da simulação, pois, apesar das temperaturas iniciais serem diferentes entre si, não há eventos anteriores, como abertura de portas, para introduzir uma aleatoriedade no funcionamento. Isso é obtido ao longo do dia conforme as portas vão sendo abertas e alimentos introduzidos.



**Figura 3.12 – Temperatura para um grupo de 100 refrigeradores ao longo de um dia (a) e num período de 2 horas em destaque (b).**



**Figura 3.13 – Funcionamento de um grupo de 100 refrigeradores. Em vermelho o refrigerador está desligado enquanto que em verde está ligado.**

### 3.7 Refrigeradores com Melhorias

Um dos tipos de gerenciamento de carga citado na seção 2.1.1 é o de *Conservação Estratégica*, onde o intuito é deslocar toda a curva de carga para baixo, reduzindo o consumo durante o dia todo, através da adoção de medidas de eficiência energética.

No caso dos refrigeradores, existem possibilidades para que isso ocorra e as que foram abordadas nesse trabalho são:

- Melhoria da isolamento – aumento da resistência térmica de condução. Esse estudo foi realizado a título de análise, pois os refrigeradores já apresentam isolamento eficiente, para melhorá-la seria necessário aumentar a espessura da parede, tornando o refrigerador inviável;
- Diminuição da quantidade de abertura de portas ao longo do dia – medidas construtivas nos refrigeradores, como por exemplo, reservatórios de água e gelo, já presente em alguns modelos atuais, eliminam a necessidade de abrir a porta do refrigerador para algumas



atividades, reduzindo o consumo de energia através da menor quantidade de ar quente que entra no refrigerador;

- Diminuição da influência da abertura de porta – consiste na adoção de dispositivos que dificultem a entrada do ar quente quando a porta é aberta. Isso pode ser feito através de uma cortina de ar criada por dispositivos (semelhante a ventoinhas) presentes nas paredes em volta da porta do refrigerador, criando um obstáculo para que mesmo com a porta aberta, o ar quente do ambiente externo não penetre no ambiente interno do refrigerador. Assim, quando a porta é aberta, menos ar quente entra no refrigerador, fazendo com que o consumo de energia seja menor;

Realizou-se simulações das três alternativas de melhoria, através da alteração dos parâmetros do *script* de inicialização do Matlab. Para melhorar a isolamento, alterou-se a condutividade térmica do material isolante (de 0,027 W/m°C para 0,020 W/m°C) de modo a obter uma resistência térmica de isolamento maior. Para diminuir a quantidade de abertura de portas ao longo do dia diminui-se a probabilidade desse evento acontecer. Originalmente a quantidade de abertura podia variar entre 3 e 10 ao longo do dia e diminuindo a probabilidade de ocorrência, esse evento pode variar de 2 a 6. Para o caso da influência da abertura da porta, diminui-se a potência que cada abertura demanda. Originalmente o valor considerado foi 20 W passando posteriormente para 10 W, em ambos os casos com duração de 30 minutos.

Os resultados obtidos, assemelham-se aos obtidos anteriormente, exceto pela redução do consumo de energia, conforme pode ser observado na Tabela 3.4. A melhoria da isolamento do refrigerador foi a modificação que resultou na maior redução do consumo mensal de energia, cerca de 13%. Quando ocorre a diminuição da quantidade de abertura de portas a redução de energia foi menor, valendo 2,1%. A adoção de cortina de ar para diminuir a influência de abertura de portas foi o item que apresentou a menor redução, 1,7%. Grandes aplicações, como supermercados, trabalham durante longos períodos com a porta aberta, assim, este dispositivo apresenta grande potencial de redução de consumo de energia. Em refrigeradores, a área de troca de calor é menor e o tempo em que a porta fica abe-

ta é pequeno, assim, o impacto desse dispositivo não é tão acentuado quanto em outros locais de uso.

**Tabela 3.4 - Comparativo do consumo mensal em kWh de um grupo de 100 refrigeradores com melhorias e características originais do modelo.**

Isolação		Quantidade de abertura		Influência da abertura	
Normal	Melhorada	Mais	Menos	Maior	Menor
4487	3993	4488	4395	4454	4377
-13%		-2,1%		-1,7%	

### 3.8 Comentários Finais

Neste capítulo foi apresentado o desenvolvimento de um modelo para um refrigerador, bem como para um conjunto deles. O modelo proposto apresentou comportamento adequado e através do modelo unitário foi criado modelo agregado, contendo 100 refrigeradores que servirá de base para os estudos seguintes. Também efetuou-se melhorias no modelo do refrigerador para analisar o impacto que estas teriam no seu funcionamento e consumo de energia.

## Capítulo 4

# Esquemas de Gerenciamento do Refrigerador

Modelado o refrigerador, surge a necessidade de desenvolver esquemas de gerenciamento para obtenção do benefício proposto. A ideia principal no gerenciamento é aproveitar a isolamento e inércia térmica do refrigerador, acumulando energia durante um intervalo de tempo e liberando-a no momento desejado, permanecendo assim desligado, promovendo a redução no consumo de energia no horário de pico.

Neste capítulo apresentam-se os esquemas de gerenciamentos propostos e a escolha daquele que apresenta melhores resultados. Deve-se ressaltar que foi levado em conta, nesta etapa da pesquisa, somente o desenvolvimento da melhor lógica para o funcionamento adequado do gerenciamento proposto. Não foi o foco da pesquisa, por enquanto, determinar como tal esquema seria implementado na prática. Esta seria uma etapa futura, dependente da implantação ou não das redes inteligentes, do sistema de medição eletrônica, da variação da tarifa em função da disponibilidade de energia, etc.

### 4.1 Gerenciamento direto

O primeiro tipo de gerenciamento proposto consiste em ligar os refrigeradores algum tempo antes do horário desejado, no caso o de pico de consumo de energia. Desta forma, o refrigerador poderia acumular energia térmica e ser desligado, para que no momento de máxima demanda de potência, o menor número possível de refrigeradores estejam em funcionamento. Esse gerenciamento pode ser feito de três formas:

1. Através de controle direto: a concessionária envia um sinal de comando para o medidor eletrônico que ligará ou desligará o refrigerador no mesmo instante. Esse tipo de gerenciamento pode ser utilizado também

em situações em que seja necessário alívio de carga, para controle de tensão e frequência;

2. A concessionária envia um comando para o medidor eletrônico, agendando o horário que refrigerador vai ser ligado e desligado;
3. O próprio consumidor agenda o horário de início do gerenciamento de acordo com o plano acertado com a concessionária de energia.

#### 4.1.1 Implementação no modelo

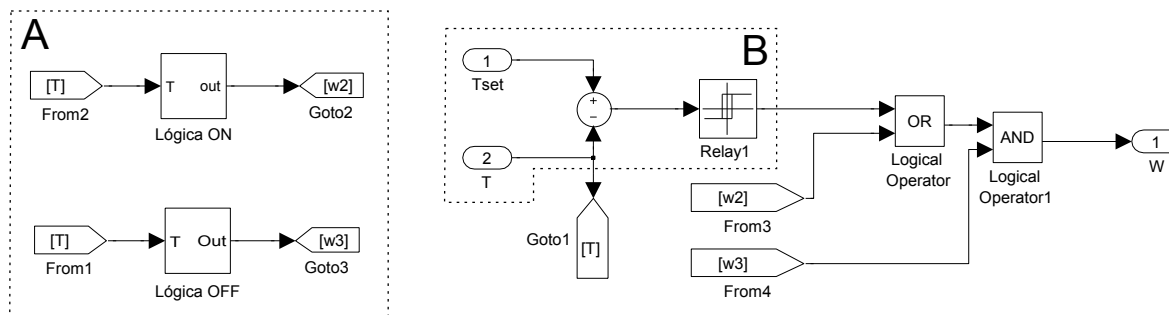
Como já foi dito anteriormente, neste trabalho apenas foi implementada a lógica necessária para que fosse obtido o comportamento desejado do refrigerador, sem preocupar-se com a implementação prática.

A implementação no modelo foi feita no bloco “*Potência Refrigerador*” da Figura 3.3, que é o responsável por ligar e desligar o refrigerador quando as temperaturas de funcionamento são atingidas. No funcionamento normal, quando a temperatura máxima ( $T_{max}$ ) é atingida, o refrigerador é ligado e permanece assim até que a temperatura mínima ( $T_{min}$ ) seja atingida, sendo então desligado.

Com o esquema de gerenciamento, o funcionamento sofre pequena alteração: definem-se os momentos em que o refrigerador será ligado ( $t_{on}$ ) para armazenar energia térmica e desligado ( $t_{off}$ ) liberando essa energia. O funcionamento desse tipo de gerenciamento pode ser explicado da seguinte forma:

- No instante  $t_{on}$ , o refrigerador recebe um sinal de comando. Se estiver desligado, entrará em funcionamento, não importando se ainda não atingiu a temperatura  $T_{max}$ . Caso já esteja em funcionamento, permanecerá assim. A partir do momento que a temperatura atinge o valor mínimo passa a ficar sob o controle normal de funcionamento;
- No instante  $t_{off}$ , o refrigerador recebe sinal de comando para desligar. Se estiver funcionando, independente se a temperatura do ar em seu interior não tiver atingido  $T_{min}$ , será desligado. A partir do momento em que a temperatura atingir o valor máximo, o controle volta a ser o normal de funcionamento.

Esse controle, como se pode observar, caracteriza-se pela inserção de dois sinais de comando ao funcionamento normal do refrigerador. A implementação no *Simulink* é mostrada na Figura 4.1.

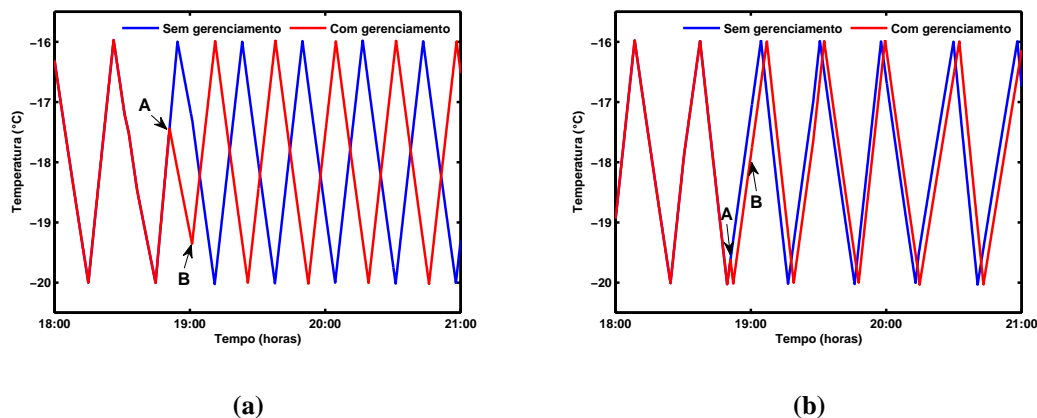


**Figura 4.1 - Implementação do gerenciamento direto.**

Na Figura 4.1 o bloco B representa o controle original do refrigerador, referente ao bloco *Potência* na Figura 3.3. O bloco A apresenta a parte adicionada, responsável por efetuar o gerenciamento do refrigerador bem como controlar a temperatura interna de forma a não violar os valores limites de funcionamento durante o gerenciamento.

### 4.1.2 Resultados do Gerenciamento

Para analisar o funcionamento do gerenciamento adotado, inicialmente verificou-se sua influência no funcionamento de um refrigerador isolado e depois em um grupo de 100 aparelhos, utilizando-se do modelo da seção 3.6. Considera-se que o pico de demanda ocorre às 19:00, assim, o gerenciamento liga o refrigerador às 18:50 e desliga-o às 19:00. Na Figura 4.2 é apresentado o comportamento da temperatura interna de um refrigerador.



**Figura 4.2 – Comparação da temperatura interna de um refrigerador com e sem gerenciamento.**

Na Figura 4.2 (a), o gerenciamento tem início no ponto A, onde o refrigerador é ligado e sua temperatura diminui até ser desligado pelo gerenciamento às 19:00, ponto B. No caso (b) o refrigerador é ligado no ponto A, e como sua temperatura já estava baixa, é desligado pelo controle de funcionamento normal do aparelho. Observando os dois casos, nota-se que este gerenciamento tem influência diferente nos refrigeradores, dependendo de seu estado atual de funcionamento. No caso (a), o refrigerador foi ligado quando sua temperatura já estava próxima do limite máximo, permanecendo ligado mais tempo e sendo desligado às 19:00. Como no segundo caso o refrigerador foi ligado quando a temperatura estava próxima do limite mínimo, o controle resultou no seu desligamento antes do tempo  $t_{off}$ . Há casos em que o refrigerador já está em funcionamento quando recebe sinal para ser ligado. Nessa situação o gerenciamento acaba não influenciando no funcionamento do refrigerador.

Na Tabela 4.1, têm-se as características de funcionamento com e sem o gerenciamento para os dois casos.

**Tabela 4.1 - Características de funcionamento do refrigerador com e sem gerenciamento direto.**

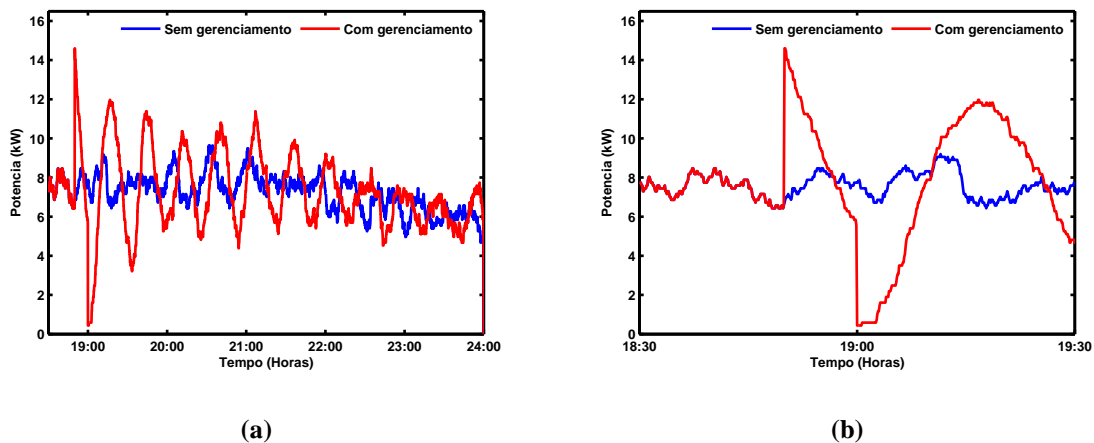
	<b>Caso (a)</b>		<b>Caso (b)</b>	
	<i>Sem gerenciamento</i>	<i>Com gerenciamento</i>	<i>Sem gerenciamento</i>	<i>Com gerenciamento</i>
<b>Funcionamento diário (horas)</b>	9,99	10,02	9,84	9,84
<b>Consumo diário (kWh)</b>	1,458	1,462	1,436	1,436
<b>Consumo mensal (kWh)</b>	43,8	43,9	43,1	43,1

Conforme pode ser observado na Tabela 4.1, no caso (a), a adoção do esquema de gerenciamento provoca um aumento de 0,30% no consumo de energia e no caso (b) não há alteração. Há casos também que a adoção do gerenciamento provoca ligeira diminuição no consumo de energia. Essa diferença no consumo de energia deve-se ao comportamento do funcionamento do refrigerador no momento em que o gerenciamento é iniciado, ou seja,

se quando o gerenciamento é iniciado a temperatura está mais próxima do limite máximo ou mínimo, acarretando em mais ou menos tempo de funcionamento.

Nos casos em que o consumo acaba ficando um pouco mais elevado, essa diferença ocorre fora do horário de pico, onde as tarifas de energia seriam mais baixas e o aumento do consumo seria compensado, não acarretando em prejuízos para o usuário.

Esse tipo de gerenciamento só resultaria em um impacto significativo se for implantado em um grande grupo de refrigeradores. Para realizar essa análise, essa lógica de controle foi implementada no modelo de 100 refrigeradores mostrado na seção 3.6. Os ajustes são os mesmos descritos anteriormente para um único refrigerador, com o pico de demanda sendo considerado as 19:00 e o gerenciamento tendo início 10 minutos antes. A Figura 4.3 (a) apresenta o comportamento da demanda de potência com e sem a adoção do gerenciamento desde quando ele é iniciado até o fim do dia e na (b) mostra-se em detalhe 30 minutos antes e depois do horário considerado como pico de demanda.



**Figura 4.3 – Demanda de potência num grupo de 100 refrigeradores com e sem gerenciamento direto.**

O gerenciamento quando adotado em um grupo de refrigeradores provoca um impacto significativo na demanda de potência. As Figura 4.3 (a) e (b) mostram que há uma grande redução na demanda de potência nos horários de pico de consumo, aproximando-se de zero às 19:00 e permanecendo abaixo da demanda original (sem gerenciamento) por 13 minutos. Porém, ao iniciar o gerenciamento, ligando todos os refrigeradores simultaneamente, há um pico elevado de potência, fazendo com que os refrigeradores passem a operar em sincronismo, recuperando a aleatoriedade de funcionamento somente após algumas horas, graças à aleatoriedade de abertura de portas e inserção de alimentos.

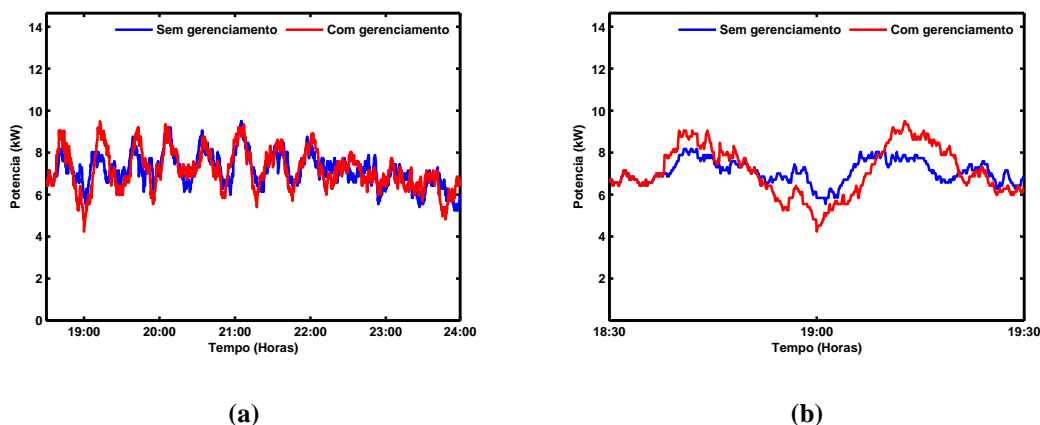
Esse tipo de gerenciamento mostrou-se eficiente e resultou em uma grande redução de demanda no momento desejado, porém por um intervalo de tempo pequeno e ao custo de um pico elevado de demanda no início do gerenciamento, sincronizando o funcionamento dos refrigeradores e afetando o comportamento da demanda do conjunto de refrigeradores por várias horas após o início do gerenciamento. Para sanar esses problemas e tentar obter melhores resultados, foi proposta uma modificação na forma do gerenciamento, apresentada na seção a seguir.

## **4.2 Gerenciamento direto em grupos**

A ideia desse tipo de gerenciamento é basicamente a mesma do anterior: o refrigerador recebe um sinal ou é feito um agendamento para ser ligado e desligado. A implementação e o comportamento individual do refrigerador frente ao gerenciamento permanece o mesmo. A diferença ocorre no comportamento em grupo dos refrigeradores.

Na seção anterior, observou-se que o início do gerenciamento provoca um pico elevado de demanda de potência. Para sanar esse problema, o grupo de 100 refrigeradores foi dividido em 10 subgrupos, para os quais se inicia o gerenciamento em momentos diferentes. No primeiro grupo, o processo é iniciado às 18:38 e os grupos seguintes são iniciados com intervalos de 2 minutos entre si. Com isso, busca-se não retirar por completo a aleatoriedade (diversidade térmica) no funcionamento dos refrigeradores e, por consequência, diminuir o pico de demanda no início do gerenciamento, bem como a sincronização dos refrigeradores nas horas seguintes ao processo de gerenciamento. Na Figura 4.4 mostra-se a demanda de potência obtida.





**Figura 4.4 – Demanda de potência num grupo de 100 refrigeradores com e sem gerenciamento direto por subgrupos.**

Observa-se que no instante que esse gerenciamento é iniciado, não há mais um elevado pico de demanda de potência como no da seção 4.1 já que os refrigeradores são ligados em intervalos intercalados. Por outro lado, a redução na demanda de potência não foi tão grande quanto no caso anterior, quando o consumo do grupo de refrigeradores foi reduzido para perto de zero às 19:00. Neste caso, no horário de pico a redução foi de aproximadamente 21,4% (de 6,1 kW para 4,8 kW). O tempo total em que a demanda do caso com gerenciamento fica abaixo da demanda original não teve elevação significativa, ficando em 16 minutos.

Embora a redução da demanda no horário de pico não tenha sido tão expressiva quanto no estudo de gerenciamento anterior, a segunda lógica de controle mostrou ter pontos positivos: não criou um elevado pico de consumo no início do processo e não afetou de forma significativa a diversidade térmica do grupo de refrigeradores, o que os colocaria em sincronismo. Entretanto, a redução da demanda de potência e, principalmente o tempo em que esta permanece menor do que o caso sem gerenciamento, são pontos que podem ser melhorados. Para isso buscou-se uma terceira alternativa de gerenciamento, apresentada na seção a seguir.

### **4.3 Gerenciamento pela temperatura média**

A ideia desse tipo de gerenciamento é semelhante a dos apresentados nas seções 4.1 e 4.2, armazenar energia térmica antes do horário de pico para então liberá-la no mo-

mento de maior consumo. A diferença fica por conta do modo como isso é feito: ao invés do envio de um sinal direto para ligar ou desligar o refrigerador, o gerenciamento é feito através de uma programação prévia que modifica as temperaturas de funcionamento ( $t_{on}$  e  $t_{off}$ ) do refrigerador durante um certo intervalo de tempo. Com isso, espera-se que a redução de demanda de potência seja mais significativa e tenha duração maior que os dois métodos anteriores.

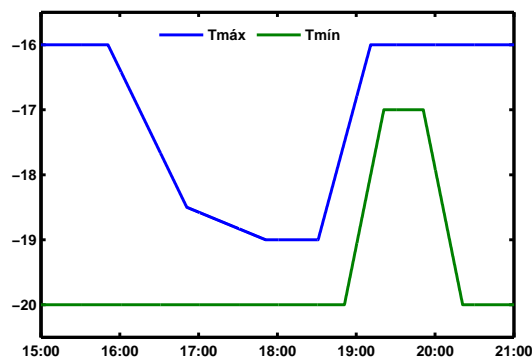
### 4.3.1 Implementação no modelo

Novamente, a implementação foi feita com o intuito de obter o comportamento desejado, criando a lógica necessária, sem considerar, por enquanto, como isto seria feito na prática.

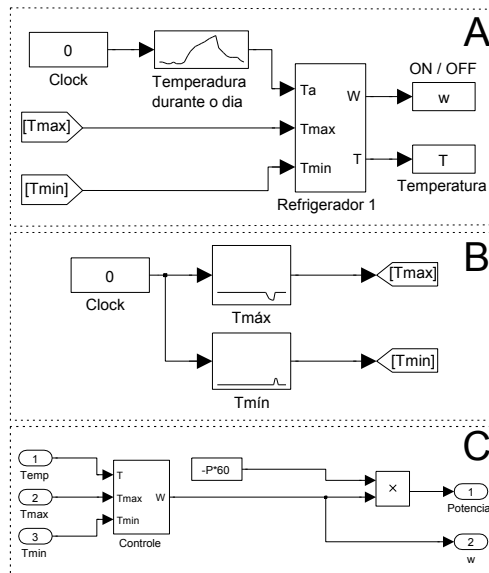
A implementação foi feita no bloco principal e no “*Potência Refrigerador*” da Figura 3.3, responsável por ligar e desligar o refrigerador. O funcionamento deste gerenciamento segue os seguintes passos, considerando que o pico de demanda ocorre as 19:00:

- Horas antes do pico, as 16:00, tem início o gerenciamento. A temperatura máxima de funcionamento ( $T_{máx}$ ) tem seu valor diminuído, aproximando-se gradativamente da temperatura mínima ( $T_{min}$ ). Com essa medida, a temperatura média do grupo de refrigeradores ficaria mais baixa, indicando que estaria ocorrendo o armazenamento de energia térmica no conjunto de refrigeradores;
- Pouco antes do horário de pico de demanda, a temperatura  $T_{máx}$  volta gradualmente ao seu valor normal, enquanto  $T_{min}$  tem seu valor gradativamente elevado, chegando próximo a  $T_{máx}$ . Isso faz com que o refrigerador fique ligado o mínimo de tempo possível, aproveitando-se da energia térmica armazenada, que agora é liberada, provocando um aumento da temperatura média do conjunto de refrigeradores;
- Algum tempo depois da elevação de  $T_{min}$ , seu valor volta ao normal, dando continuidade a liberação de energia térmica e fazendo com que o refrigerador passe a operar com seus controles normais.

A Figura 4.5 mostra a variação das temperaturas de funcionamento do refrigerador ao longo do período de gerenciamento e a Figura 4.6 a implementação do gerenciamento no modelo *Simulink*, onde o bloco A é o modelo do refrigerador, o B é o responsável pela variação de  $T_{máx}$  e  $T_{mín}$  e o bloco C é o bloco “Potência do refrigerador”. Nota-se, neste caso, que os refrigeradores operariam com referência dinâmica de temperaturas no seu ciclo liga-desliga, de maneira a canalizar a temperatura média de um grupo de refrigeradores, proporcionando o armazenamento ou liberação da energia térmica acumulada durante o processo de gerenciamento.



**Figura 4.5 – Temperaturas limites de funcionamento do refrigerador com gerenciamento.**



**Figura 4.6 – Implementação do gerenciamento por temperatura média no modelo do refrigerador.**

### 4.3.2 Resultados do Gerenciamento

Com esta lógica de gerenciamento implementada no modelo, fez-se simulações para observar seu funcionamento. Inicialmente efetuou-se em um único refrigerador. Na Figura 4.7 apresenta-se o resultado para três casos: (a) consumo maior com gerenciamento, (b) consumo menor com o gerenciamento e (c) consumo igual com o gerenciamento, com os dados referentes ao funcionamento sendo apresentados na Tabela 4.2.

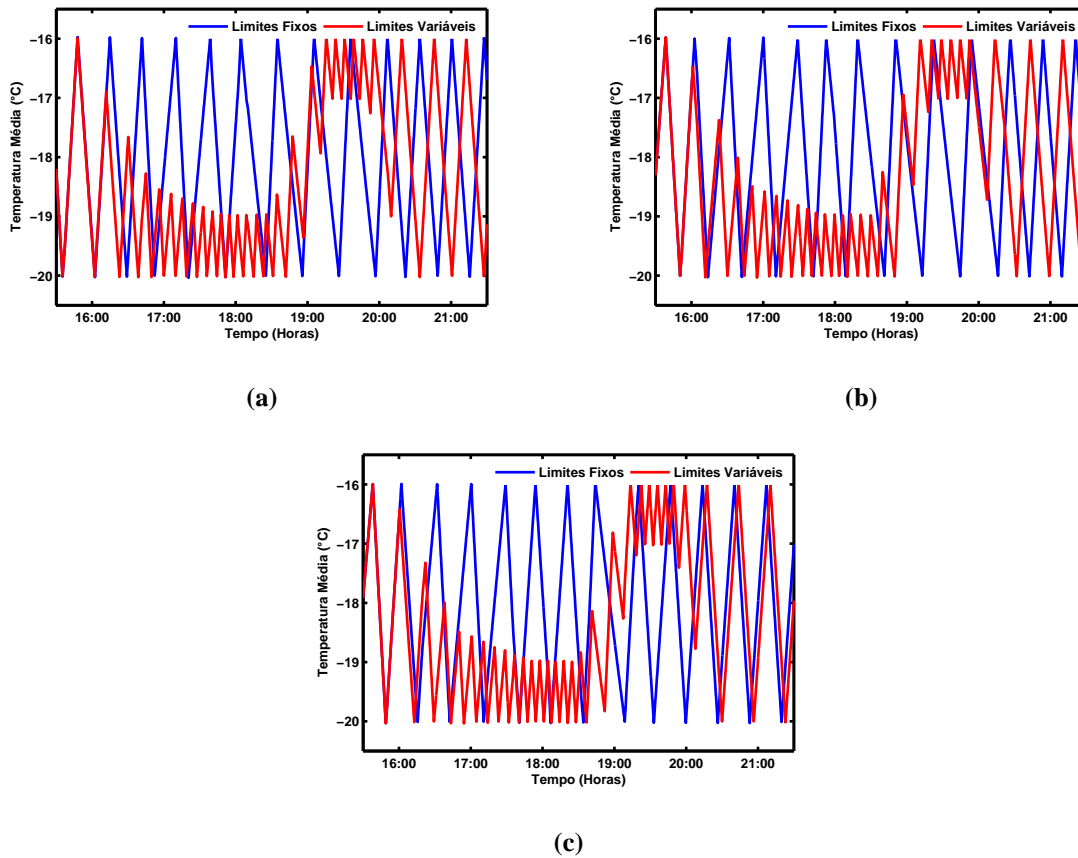


Figura 4.7 – Resultado do gerenciamento para três casos: (a) consumo menor, (b) consumo maior e (c) consumo igual na presença de gerenciamento.

Tabela 4.2 – Comparação do funcionamento do refrigerador com e sem gerenciamento para três casos.

	Caso (a)		Caso (b)		Caso (c)	
	<i>Com ger.</i>	<i>Sem ger.</i>	<i>Com ger.</i>	<i>Sem ger.</i>	<i>Com ger.</i>	<i>Sem ger.</i>
<b>Funcionamento/dia (h)</b>	10,1	10,2	10,9	10,8	9,4	9,4
<b>Consumo/dia (kWh)</b>	1,48	1,49	1,59	1,58	1,37	1,37
<b>Consumo/mês (kWh)</b>	44,4	44,7	47,6	47,5	41,6	41,6

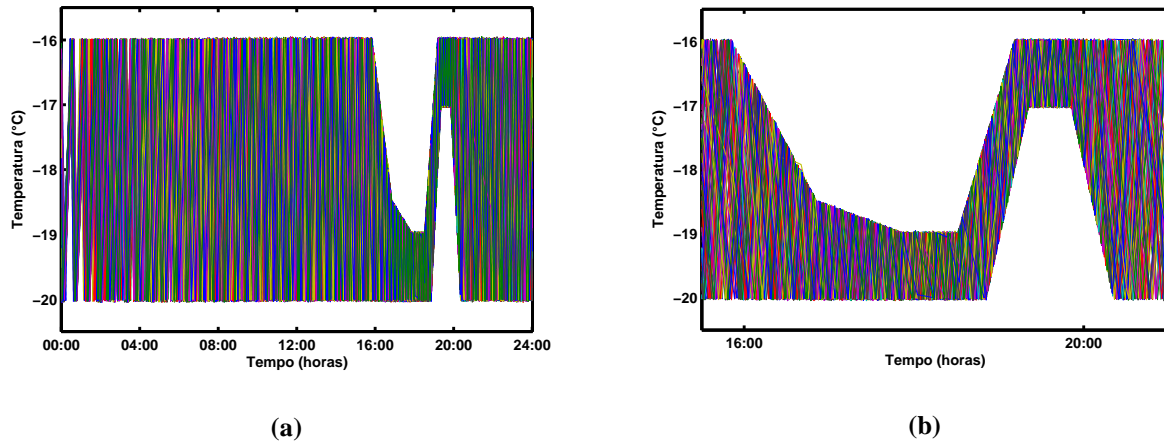
Nos três casos o comportamento é semelhante: quando o gerenciamento é iniciado a temperatura do refrigerador começa a diminuir devido a redução de  $T_{máx}$ , permanecendo por um certo tempo com valores mais baixos que o normal, para possibilitar o armazenamento da energia térmica. Quando o horário de pico de demanda está próximo, ocorrem as mudanças nas temperaturas de referência liga/desliga, fazendo com que a temperatura do refrigerador se eleve, provocando a liberação da energia armazenada. Após certo tempo, as temperaturas  $T_{máx}$  e  $T_{min}$  voltam aos valores normais, e o refrigerador volta a apresentar comportamento similar ao funcionamento anterior ao início do processo de gerenciamento.

Como nos gerenciamentos anteriores, este também influencia o tempo que o refrigerador permanece ligado e, conseqüentemente, seu consumo. Há casos em que o consumo passa a ser maior, menor ou permanece o mesmo, dependendo do estado de funcionamento no início do gerenciamento. Se a temperatura estiver mais perto do novo valor de  $T_{máx}$  o refrigerador funcionará um pouco menos do que se estiver mais próximo de  $T_{min}$ .

Nos casos simulados, o aumento de consumo de energia obtido foi de 0,68% no caso (a) enquanto a redução foi de 0,21% no caso (b). Embora o aumento no consumo não seja elevado, poderia ser compensado com a adoção de tarifas variáveis ao longo do dia ou com patamares diferenciados.

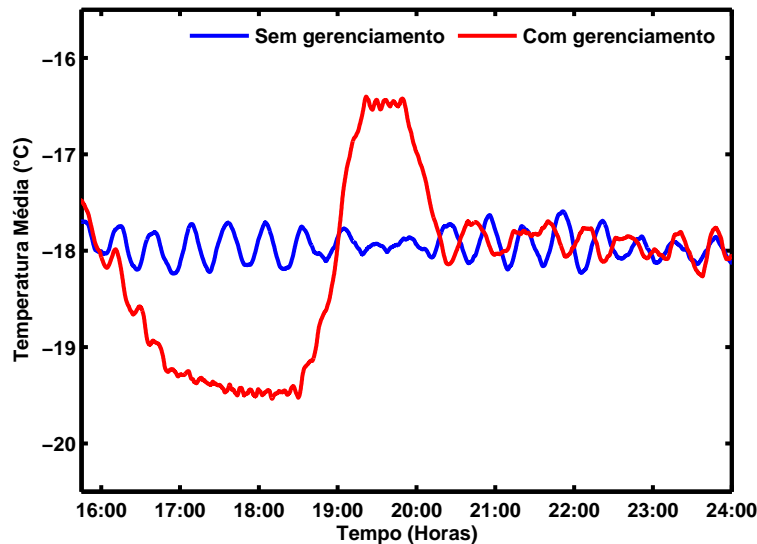
Como nas seções anteriores, faz-se necessário analisar o comportamento de um grupo de refrigeradores submetidos a esse novo tipo de gerenciamento, de modo a analisar seu comportamento e verificar a viabilidade de ser implementado e os impactos que poderia proporcionar. Foi feita então uma simulação com um grupo de 100 refrigeradores, todos com o gerenciamento através da temperatura média, e considerando que o pico de demanda ocorre as 19:00. Os resultados obtidos são mostrados a seguir.

A Figura 4.8 mostra o comportamento da temperatura do grupo de 100 refrigeradores ao longo do dia (a) e com destaque para o período de ação do gerenciamento (b). pode-se observar que a temperatura fica dentro da faixa limite de operação estabelecida, seguindo os limites de temperatura mostrados na Figura 4.5, tendo o grupo comportamento semelhante ao unitário da Figura 4.7.



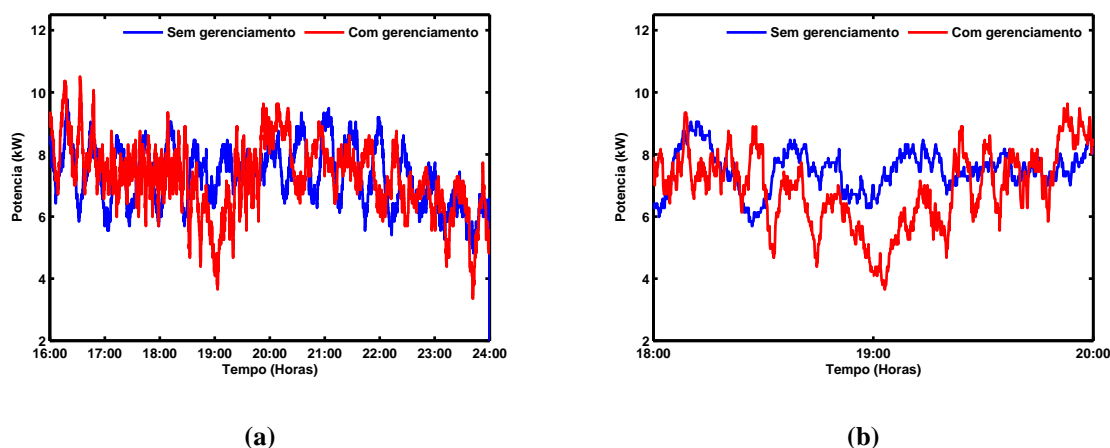
**Figura 4.8 – Temperatura de um grupo de 100 refrigeradores com gerenciamento (a) ao longo do dia e (b) com destaque para o período do gerenciamento.**

O comportamento da temperatura média do grupo pode ser observado na Figura 4.9. Pode-se notar comportamento semelhante ao de um único refrigerador: temperatura média diminuindo, indicando o armazenamento de energia e depois subindo quando a energia é liberada. Por representar um grupo de refrigeradores, a temperatura média no caso sem o gerenciamento tende a ficar em torno de  $-18^{\circ}\text{C}$ , média entre  $T_{\text{máx}}$  e  $T_{\text{mín}}$ .



**Figura 4.9 – Temperatura média de um grupo de 100 refrigeradores com e sem gerenciamento.**

A demanda de potência pode ser vista na Figura 4.10 (a) das 16:00 as 24:00 e (b) num intervalo de tempo mais próximo do pico de demanda.



**Figura 4.10 – Demanda de potência de um grupo de 100 refrigeradores com e sem gerenciamento pela temperatura média.**

Com a adoção do gerenciamento, pode-se observar que ao contrário do apresentado na seção 4.1, não há a ocorrência de pico elevado de demanda de potência no início do processo, há apenas um ligeiro aumento na demanda em decorrência dos refrigeradores alterarem seu funcionamento para adequarem-se aos novos valores de temperaturas de funcionamento. A redução da demanda de potência não é tão significativa quanto ao tipo referido anteriormente, onde a demanda chegou a próximo de zero, porém apresenta valor considerável: as 19:00, a redução na demanda é de aproximadamente 41,5%. Mas o fator que mais se destaca é o tempo no qual a demanda fica abaixo da original: 51 minutos, quase 3,5 vezes maior que o melhor resultado obtido na seção 4.2.

## 4.4 Comparativo entre os Métodos de Gerenciamento

A seguir, estabelece-se um comparativo entre os três métodos de gerenciamento propostos, visando escolher aquele que apresenta melhores características para ser utilizado nos estudos subsequentes.

Nos três tipos, o consumo dos refrigeradores foi variável com a adoção do gerenciamento. Em alguns casos o consumo foi maior, em outros menor e casos em que se manteve o mesmo nível de consumo. O gerenciamento direto apresenta como sua maior vantagem a grande redução da demanda de potência no momento de pico do sistema. Entretanto, ao iniciar o processo de gerenciamento ocorre um pico elevado na demanda do grupo de refrigeradores e também a sincronização dos mesmos em seus ciclos de liga/desliga.

Aliado a isto destaca-se o pouco tempo em que a demanda do grupo fica abaixo dos valores originais (sem gerenciamento). Estes aspectos negativos inviabilizam seu uso com intuito de reduzir a demanda no horário de pico.

O gerenciamento direto em grupos sanou o problema do elevado pico de demanda em seu início, mas apresentou redução de demanda, comparada com a original, menor que a do gerenciamento indireto. O tempo total em que houve redução da demanda manteve-se praticamente o mesmo comparado com o gerenciamento indireto, considerado baixo para o propósito de reduzir a demanda no horário de pico.

O gerenciamento através da temperatura média foi o que apresentou melhores resultados: inexistência de pico elevado em seu início, redução considerável da demanda de potência no horário de pico e maior duração do intervalo de tempo em que isso ocorre. Assim, esse tipo de gerenciamento foi o adotado para os estudos de impacto do processo de gerenciamento dos refrigeradores no sistema elétrico.

## **4.5 Comentários Finais**

Neste capítulo buscou-se um método para o gerenciamento dos refrigeradores que apresentasse características que proporcionassem a redução de energia no horário de pico. Para isso foram propostos três esquemas de gerenciamento, cada um deles com suas características positivas e negativas. Foi escolhido aquele que apresentou o melhor equilíbrio entre as seguintes características: simples deslocamento do pico ou mesmo sua ampliação no início do processo; sincronização dos refrigeradores destruindo a diversidade térmica do grupo; magnitude da redução de consumo no horário de pico; e duração total em que o processo de gerenciamento propiciaria redução do consumo no horário de pico. Levando em conta este conjunto de características, foi escolhido o método de gerenciamento através da temperatura média dos refrigeradores, que passa a ser utilizado a partir de agora em todos os estudos.



## Capítulo 5

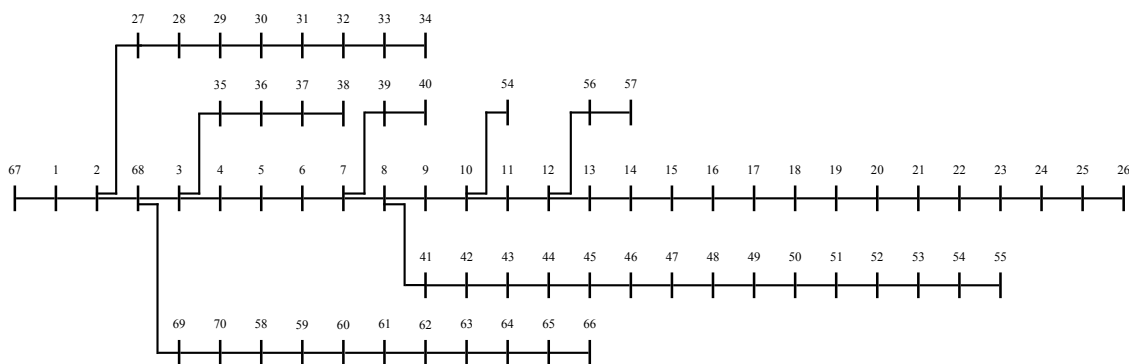
# Impacto do Gerenciamento de Refrigeradores no Sistema Elétrico

No capítulo anterior foram propostos três tipos de gerenciamento, analisando o impacto que cada um teria no funcionamento de um grupo de refrigeradores. Foi escolhido então o tipo que apresentava as características mais favoráveis e neste capítulo estuda-se o impacto que o gerenciamento teria em um sistema elétrico.

O estudo foi feito através de fluxo de carga. As barras de carga do sistema elétrico foram submetidas a uma curva de carga e a cada passo de iteração foi inserido o comportamento do grupo de refrigeradores com gerenciamento, conforme será explicado detalhadamente neste capítulo.

### 5.1 Sistema utilizado para estudo

Para realização dos estudos, foi utilizada a rede de distribuição mostrada na Figura 5.1.



**Figura 5.1 – Sistema elétrico utilizado.**

Esse sistema possui 70 barras e 69 ramos. Sua carga é de 3,8 MW e 2,7 MVA. A tensão na subestação vale 12,66 kV, mesmo valor da tensão de base. A potência de base utilizada é de 10 MVA ([39]). As barras do sistema foram submetidas à curva de carga da

Figura 5.2, a qual representa o comportamento típico de alimentadores residenciais. Multiplicando-se a potência ativa do caso base de cada barra pelo fator de carregamento da curva de carga, obtém-se a curva de demanda diária para cada uma das barras do sistema. O mesmo foi feito para a potência reativa, como mostrado na equação (5.1).

$$\begin{aligned} P(t) &= P_{base} \cdot \lambda(t) \\ Q(t) &= Q_{base} \cdot \lambda(t) \end{aligned} \quad (5.1)$$

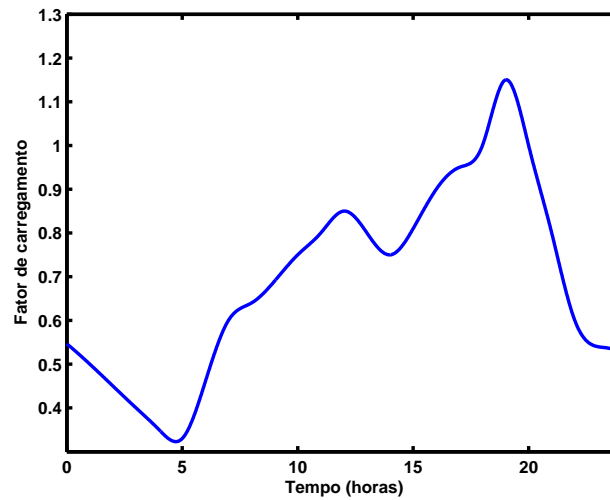


Figura 5.2 – Curva de carga do sistema.

## 5.2 Inclusão do Gerenciamento dos Refrigeradores no Sistema Elétrico

Como já foi dito, a análise do impacto que o gerenciamento dos refrigeradores pode causar no sistema elétrico, foi feito através de fluxo de carga. Para isso, utilizou-se o programa MatPower ([40]).

Inicialmente é necessário encontrar o número de refrigeradores em cada barra de carga. Para isso procedeu-se da seguinte forma:

- Nas barras com carga, considerou-se que os refrigeradores são responsáveis por 10% da demanda total [41];
- A potência média de um refrigerador é de 75W;

- Encontra-se o número de refrigeradores em cada barra com carga, mostrado na Tabela 5.1;
- O número mínimo de refrigeradores em cada barra foi de 50. Barras que apresentaram número de refrigeradores inferior não foram incluídas no gerenciamento.

**Tabela 5.1 - Quantidade de refrigeradores em cada barra.**

<b>Quantidade de Refrigeradores</b>	<b>Barras</b>
50	6, 8, 9, 15, 23, 27, 28, 39, 42, 43, 50 56, 57, 59, 60, 65, 66, 69, 70
100	7, 16, 17, 20, 36, 47, 53
200	10, 11, 52
400	37, 38
1500	49

Após ser encontrado o número de refrigeradores em cada barra, realiza-se simulação dinâmica do grupo de refrigeradores com e sem gerenciamento, encontrando assim a curva diária de demanda de potência de cada grupo. Esse resultado é utilizado para inserir a influência do gerenciamento no sistema elétrico, feito da seguinte forma:

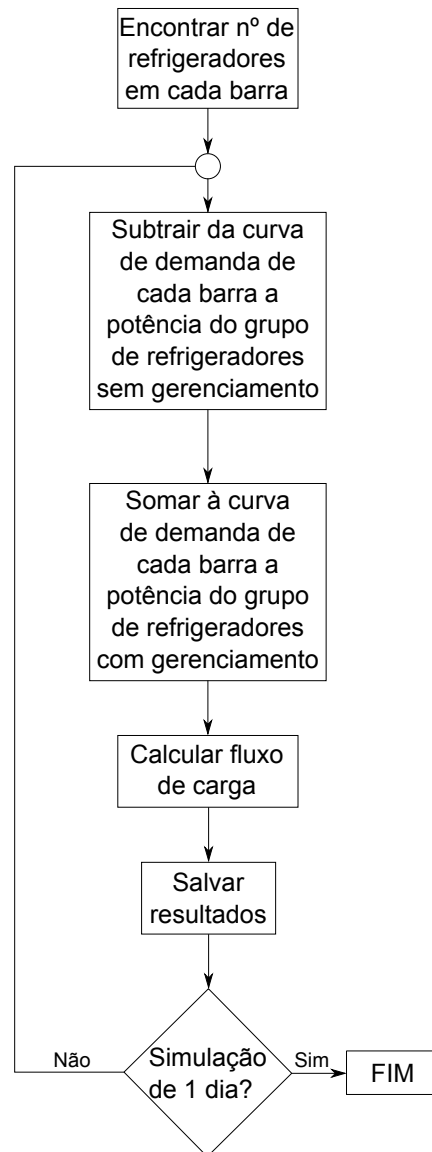
- De posse da curva de demanda da barra, subtrai-se de sua potência  $P(t)$  (encontrada na equação (5.1)) a potência do grupo de refrigeradores correspondentes sem gerenciamento ( $P_{sem}$ );
- Adiciona-se a potência do grupo de refrigeradores com o gerenciamento ( $P_{com}$ );

$$P = P(t) - P_{sem} + P_{com} \quad (5.2)$$

- Feito isso em todas as barras que serão incluídas no gerenciamento, calcula-se o fluxo de carga, armazenando os dados do sistema;

- Incrementa o passo de tempo para o próximo ponto e repete-se o procedimento até que seja feito para o período correspondente a 1 dia, com passo de 1 minuto;

A Figura 5.3 apresenta um fluxograma de como é feita a inserção do gerenciamento no sistema elétrico.



**Figura 5.3 – Fluxograma da inserção do gerenciamento no sistema elétrico.**

## **5.3 Resultados da Inserção do Gerenciamento de Refrigeradores no Sistema Elétrico**

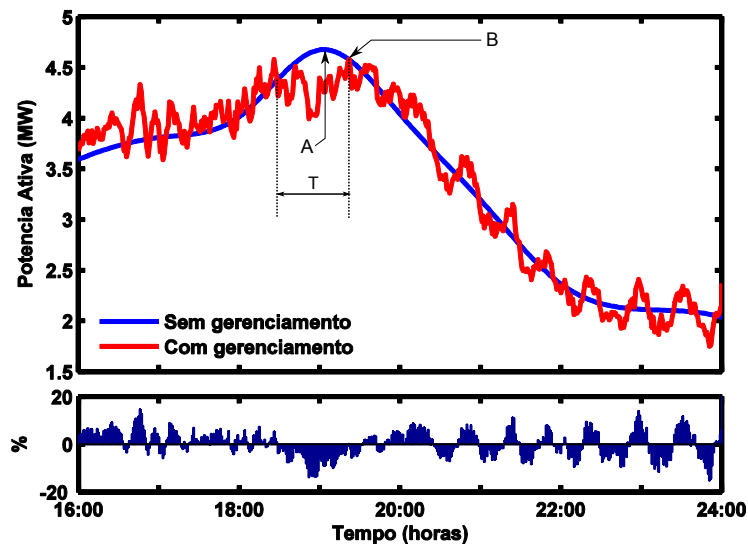
Com as simulações realizadas, foi feita uma análise do impacto que o gerenciamento dos refrigeradores ocasiona no sistema elétrico. Analisou-se o comportamento da demanda de potência ativa, consumo de energia, perfil de tensão na subestação e em todas as barras onde foi incluído o gerenciamento e também nas perdas ativas totais e nos ramos do sistema.

### **5.3.1 Impacto do gerenciamento na demanda de potência ativa**

O comportamento da demanda de potência ativa é o foco principal desse estudo, já que através do gerenciamento dos refrigeradores procura-se reduzi-la durante o horário de maior carregamento do sistema.

Através dos resultados obtidos nos sucessivos fluxos de carga calculados, obteve-se a curva de demanda de potência ativa de cada barra, conforme procedimento explicado na seção 5.2. É necessário também efetuar cálculos de fluxo de carga sem a inserção do gerenciamento de refrigerador para que possa ser feita comparação. Isso é feito utilizando a potência ativa  $P(t)$  obtida na equação (5.1), através de sucessivos fluxos de carga, obtendo o resultado ao longo de um dia.

Primeiramente analisa-se a curva de demanda de potência ativa da subestação. Ela consiste no somatório da demanda em todas as barras e perdas nos ramos do sistema. O resultado é mostrado na Figura 5.4.



**Figura 5.4 – Demanda de potência ativa na subestação com e sem gerenciamento.**

O ponto A indica o instante em que ocorre a máxima demanda de potência, às 19:03. Sem gerenciamento o valor máximo da demanda é de 4,676 MW. A presença do gerenciamento reduz, nesse instante, a demanda para 4,259 MW, uma redução de 8,9%, conforme indicado na parte de baixo da Figura 5.4. Esta parte da figura mostra a variação percentual na demanda de potência do instante que o gerenciamento é iniciado até o fim do dia. Observa-se que durante o período de maior carregamento do sistema, a redução percentual chega a ficar em mais de 10 % (das 18:52 às 18:58) e que em todo o intervalo de tempo representado por T (54 minutos) na Figura 5.4 a demanda de potência com gerenciamento fica inferior à sem gerenciamento.

Observa-se que a duração do intervalo representado por T é praticamente a mesma (51 minutos) do obtido na seção 4.3.2, onde foi analisado o efeito do gerenciamento em um grupo de 100 refrigeradores. Outro fator de destaque é o fato de o maior pico de demanda com a inserção do gerenciamento, indicado pelo ponto B que vale 4,582 MW, fica 2% abaixo do valor máximo de demanda sem gerenciamento.

Isso mostra que a adoção do gerenciamento não só provoca redução da demanda durante um intervalo de tempo considerável, mas também não ocasiona uma demanda maior que a original, não utilizando recursos a mais da rede comparado ao que já estava sendo usado.

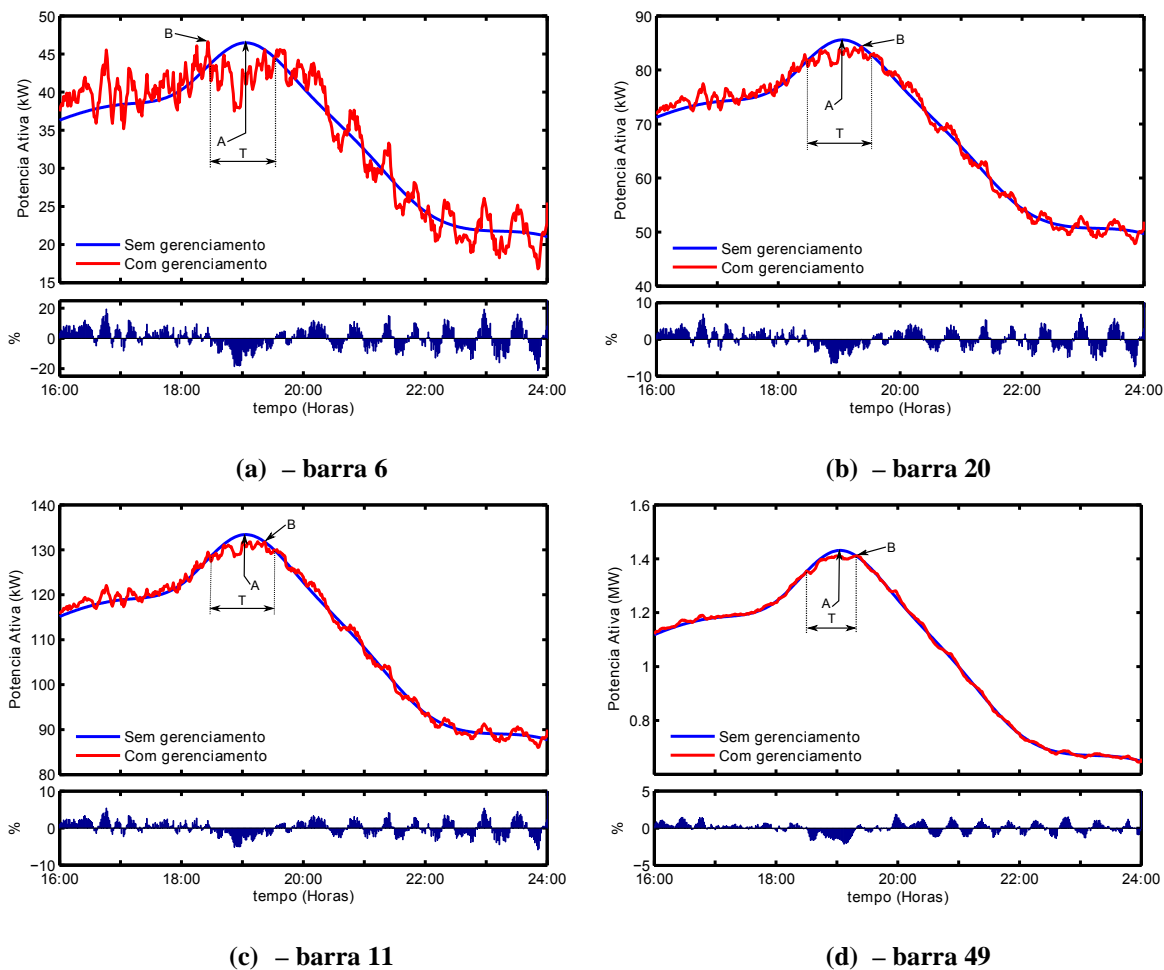
A parte de baixo da Figura 5.4, variação percentual da demanda de potência, mostra que os refrigeradores funcionam com menor sincronismo, já que por poucos instantes o aumento da demanda provocada pelo início do gerenciamento fica superior a 10%, permanecendo na média um pouco acima de 5% e com duração não muito grande – a maior duração é no início do gerenciamento, 35 minutos, o que é justificável pelo fato dele iniciar-se ao mesmo tempo em todos os refrigeradores.

Outro ponto importante que deve ser analisado frente à adoção do gerenciamento é o consumo de energia, mostrado na Tabela 5.2. Nesta tabela são apresentados dados referentes às barras em que o gerenciamento foi aplicado. Pode-se observar que praticamente não houve variação do consumo diário de energia no sistema estudado. Isso se justifica pelo fato da adoção do *deslocamento de carga* como método de gerenciamento de carga. O consumo que havia no momento de maior carregamento foi deslocado para momentos anteriores e posteriores. O horário em que a demanda fica acima comparada ao caso sem gerenciamento, são compensados pelos horários em que fica abaixo, fazendo com que o consumo de energia acabe ficando praticamente o mesmo ao longo do dia. No entanto, com menor custo para o consumidor se assumirmos que a tarifa poderá variar em tempo real.

**Tabela 5.2 – Comparativo do consumo diário (MWh) de energia com e sem gerenciamento.**

Barra	Sem	Com	Barra	Sem	Com	Barra	Sem	Com
<i>Subst.</i>	66,06	66,05	<b>23</b>	0,4663	0,4661	<b>50</b>	0,5329	0,5327
<b>6</b>	0,6728	0,6726	<b>27</b>	0,4330	0,4328	<b>52</b>	3,7806	3,7804
<b>7</b>	1,2491	1,2489	<b>28</b>	0,4330	0,4328	<b>53</b>	0,9826	0,9824
<b>8</b>	0,4996	0,4994	<b>36</b>	1,3157	1,3155	<b>56</b>	0,4663	0,4661
<b>9</b>	0,4663	0,4661	<b>37</b>	6,4070	6,4068	<b>57</b>	0,4663	0,4661
<b>10</b>	2,4149	2,4147	<b>38</b>	6,4070	6,4068	<b>59</b>	0,3997	0,3995
<b>11</b>	2,4149	2,4147	<b>39</b>	0,6745	0,6743	<b>60</b>	0,3997	0,3995
<b>15</b>	0,7576	0,7574	<b>42</b>	0,4396	0,4395	<b>65</b>	0,6532	0,6530
<b>16</b>	0,9993	0,9990	<b>43</b>	0,3997	0,3995	<b>66</b>	0,6532	0,6530
<b>17</b>	0,9993	0,9990	<b>47</b>	1,6654	1,6653	<b>69</b>	0,4330	0,4328
<b>20</b>	1,8986	1,8984	<b>49</b>	20,718	20,722	<b>70</b>	0,4330	0,4328

Os resultados obtidos individualmente nas barras do sistema são semelhantes ao da subestação. Na Figura 5.5, mostra-se a demanda de potência para algumas barras com quantidades diferentes de refrigeradores.



**Figura 5.5 – Demanda de potência ativa nas barras 6 (a), 20 (b), 11(c) e 49 (d).**

Analisando os resultados obtidos nessas quatro barras, nota-se que assim como para a subestação do sistema, o gerenciamento foi capaz de reduzir a demanda de potência no horário de pico (ponto A), por um intervalo de tempo considerável e sem criar um pico de demanda que fosse mais elevado do que sem gerenciamento.

A barra 6 possui 50 refrigeradores para análise do impacto do gerenciamento. Ela apresentou uma redução percentual de 11,6% no horário de pico, de 46,5 kW para 41,0 kW, tendo o maior pico com gerenciamento (ponto B no gráfico) valendo 46,6 kW, com uma redução da demanda (intervalo T no gráfico) durante 64 minutos. Esse tempo é o mesmo para as barras 20 e 11.

A barra 20, que possui 100 refrigeradores, apresentou uma redução de 4,1% na demanda, de 131,1 kW para 125,7 kW, com o novo pico (ponto B no gráfico) valendo 128,5 kW, enquanto a barra 11 com 200 refrigeradores teve redução de 3,2%, de 166,8 kW

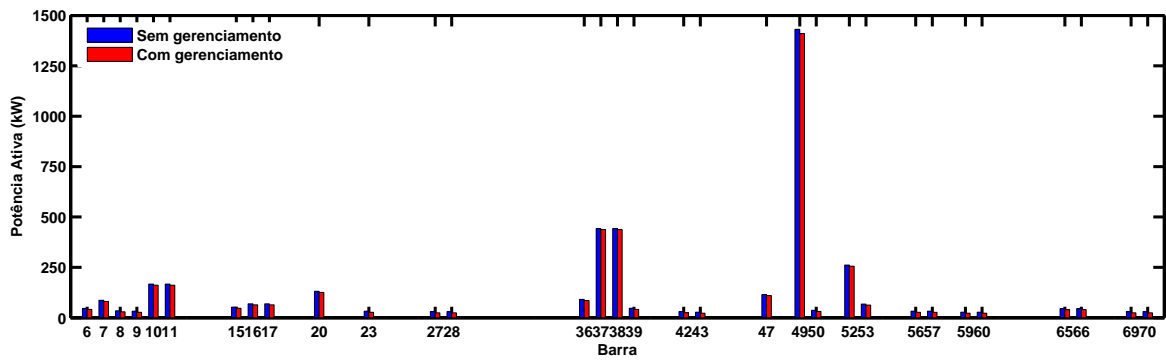


para 161,4 kW, com novo pico valendo 163,5 kW. A barra 49, que possui 1500 refrigeradores, apresentou menor redução dentre as mostradas: 1,5%, com a demanda de potência indo de 1,431 MW para 1,410 MW, com o novo pico valendo 1,411 MW e redução da demanda durante 49 minutos.

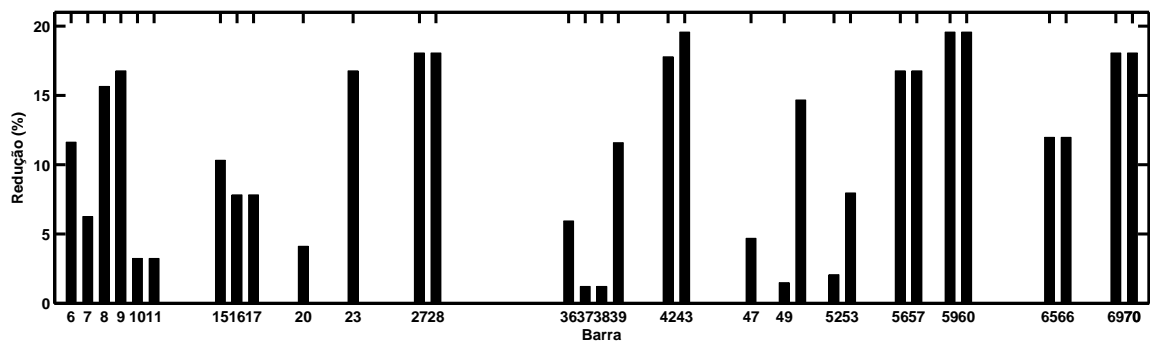
A Figura 5.6 apresenta os resultados de demanda de potência no instante de maior carregamento, com e sem gerenciamento (a) e a redução obtida com a adoção do gerenciamento (b) em todas as barras. Nota-se que a maioria das barras teve redução acima de 10%. As barras que apresentaram menor redução na demanda foram as 37 e 38 (1,22%).

Na Figura 5.6 observa-se que as barras com menor quantidade de refrigeradores são aquelas que apresentam maior redução percentual quando o gerenciamento é adotado. Por exemplo: na barra 43, com 50 refrigeradores, apresenta redução percentual de 19,6%, enquanto na barra 49 com 1500 refrigeradores a redução percentual é de 1,49%, porém ela apresenta redução de 20 KW frente a 5,4 kW na barra 43. Com a contribuição de todas as barras, a subestação do sistema atinge uma redução percentual de 8,9% e de 417 kW no horário de maior demanda.

Para permitir uma análise do impacto do gerenciamento proposto, pode-se fazer uma comparação com os resultados obtidos através da adoção do horário de verão no período 2008-2009, mostrado na Figura 5.7 [42]. No horário de verão, há deslocamento do pico de demanda em aproximadamente uma hora e redução de 4,2% na demanda de pico do sistema Sudeste/Centro-Oeste. Conclui-se, portanto, que o gerenciamento dos refrigeradores domésticos, se expandido para toda a rede brasileira, tem potencial para ajudar na redução do consumo no horário de pico de demanda.



(a)



(b)

Figura 5.6 – Demanda de potência ativa com e sem gerenciamento em todas as barras (a) e diferença em % (b) no horário de maior carregamento do sistema.

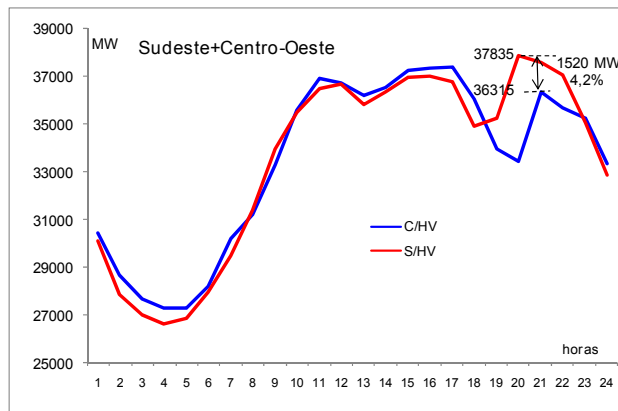


Figura 5.7 – Redução da demanda na hora da ponta do subsistema SE/CO ([42]).

### 5.3.2 Impacto do gerenciamento nas perdas ativas nos ramos do sistema

Estudou-se também o impacto do gerenciamento nas perdas ativas nos ramos do sistema. Espera-se que as perdas ativas diminuam uma vez que a redução de carga no horário de maior carregamento provoca diminuição do fluxo de corrente através dos ramos e, conseqüentemente, diminuição nas perdas. A Figura 5.8 mostra as perdas totais do sistema a partir das 16:00 (horário que o gerenciamento é iniciado) até o final do dia.

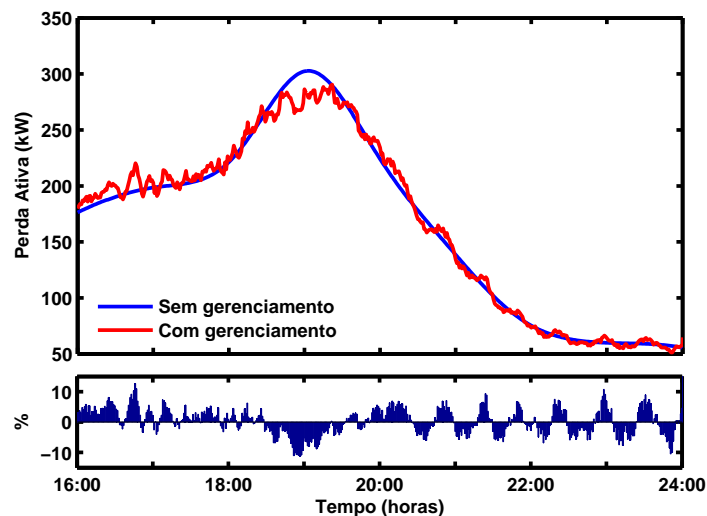
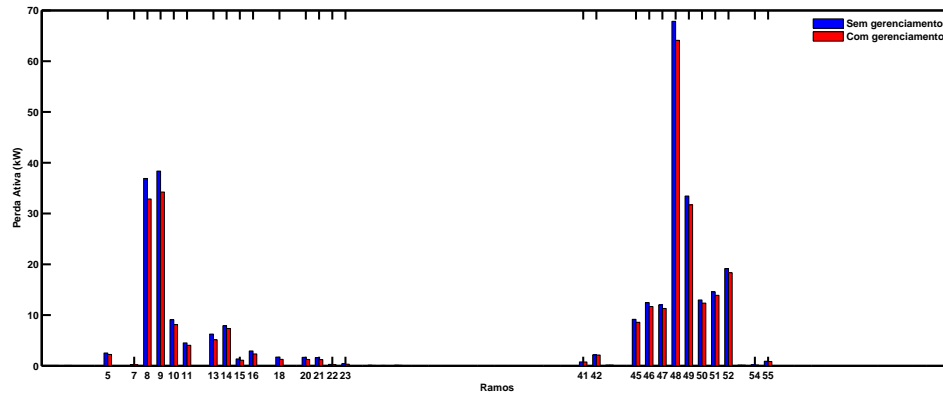
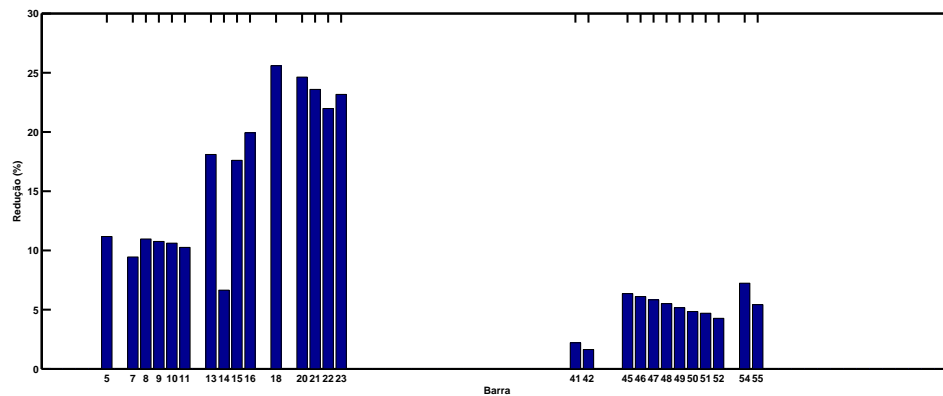


Figura 5.8 – Perdas ativas totais no sistema.

Da Figura 5.8 pode-se observar que a perda total de potência ativa apresenta comportamento semelhante à demanda de potência. As perdas, que no instante de maior carregamento do sistema, totalizavam 302,8 kW passaram para 279 kW com o gerenciamento, uma redução de 7,6%, equivalendo a 23,8 kW. Outro fator que permanece com comportamento semelhante é o tempo no qual a perda ativa com o gerenciamento permanece abaixo da perda original, 54 minutos. A perda de energia nos ramos permaneceu com mesmo valor nos dois casos: 2,736 MWh sem gerenciamento e 2,735 MWh com gerenciamento. A Figura 5.9 mostra a perda ativa no instante de maior carregamento em todos os ramos do sistema. Nela pode-se observar que o gerenciamento proporcionou redução nas perdas em todos os ramos, sendo que os que não aparecem no gráfico apresentam valores baixos para a escala utilizada (esses também apresentam redução de perdas).



(a)



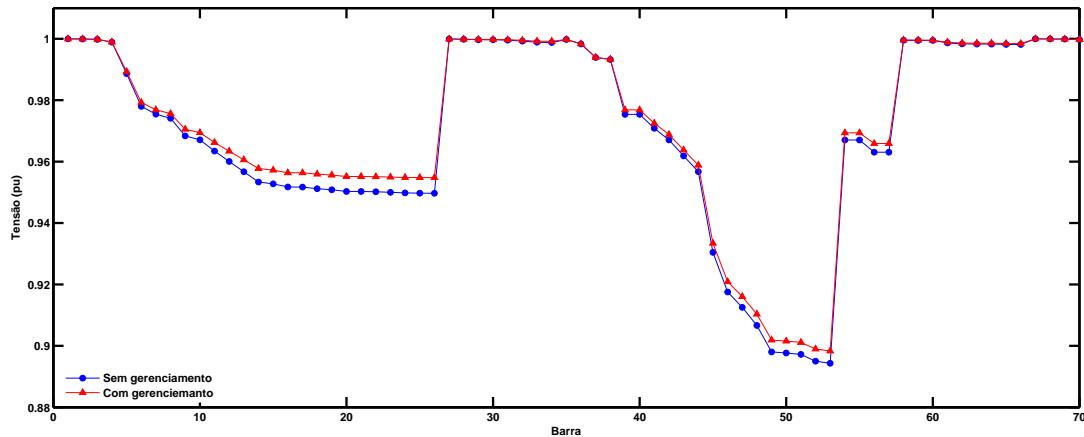
(b)

**Figura 5.9 – Perdas ativas nos ramos do sistema com e sem gerenciamento (a) e variação percentual (b) no horário de maior carregamento do sistema.**

Observando a Figura 5.9 (a) nota-se que os ramos que apresentam maiores perdas ativas são os ramos 8, 9 e de 45 a 52, sendo que o 8, 9 e 52 são os que apresentam maior redução em kW. Os ramos 18 a 23 são os que apresentam as maiores reduções percentuais. Isso se deve ao fato de a perda nesses ramos serem pequenas e uma pequena variação em kW corresponde a um percentual maior (uma variação de 1 kW tem maior influência num ramo que possui perda de 10 kW do que em um que possui 50 kW).

### 5.3.3 Impacto do gerenciamento no perfil de tensão do sistema.

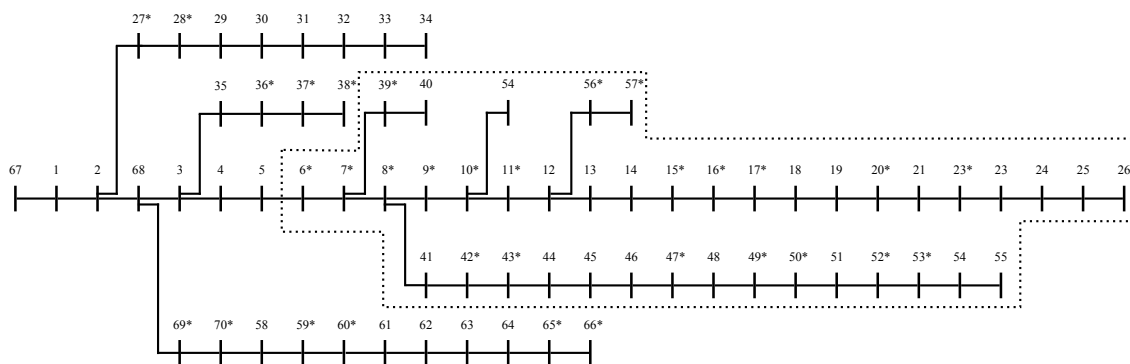
Outro parâmetro a ser analisado com a adoção de gerenciamento é a tensão nas barras. A Figura 5.10 mostra o perfil de tensão do sistema no instante de maior carregamento.



**Figura 5.10 – Perfil de tensão do sistema no horário de maior carregamento do sistema.**

Pode-se observar que a adoção do gerenciamento dos refrigeradores, ao promover um alívio de carga no instante de maior carregamento, provoca uma elevação no perfil de tensão do sistema. A barra mais crítica, que apresenta menor valor de tensão, é a 53 com 0,894 p.u.. A implementação do gerenciamento eleva a tensão para 0,898 p.u. 0,004 a mais, correspondendo a 50,6V. Nota-se que este sistema apresenta perfil de tensão inadequado, e que o gerenciamento de carga pode ajudar também no aspecto do controle e melhoria do perfil de tensão da rede.

Na Figura 5.11, dentro da área pontilhada estão as barras do sistema onde houve melhoria na tensão. As barras com asterisco são as que apresentam gerenciamento de refrigeradores. Nota-se que dentro de certa região todas as barras sofreram melhorias na tensão, até mesmo aquelas que não apresentam gerenciamento.



**Figura 5.11 – Barras do sistema onde houve melhoria no perfil de tensão.**

## 5.4 Resultados para refrigeradores com melhorias

Na seção 3.7 foram apresentadas algumas modificações pensadas para melhorar o desempenho do refrigerador: melhor isolamento térmica, diminuição da quantidade de abertura de porta e diminuição da influência desse evento. Nesta seção apresentam-se os resultados obtidos quando esses refrigeradores são inseridos no sistema. Deve-se ressaltar que em cada caso, todos os refrigeradores são idênticos, ou seja, quando se analisa o efeito da melhoria da isolamento, isso é feito em todos os refrigeradores do sistema simultaneamente.

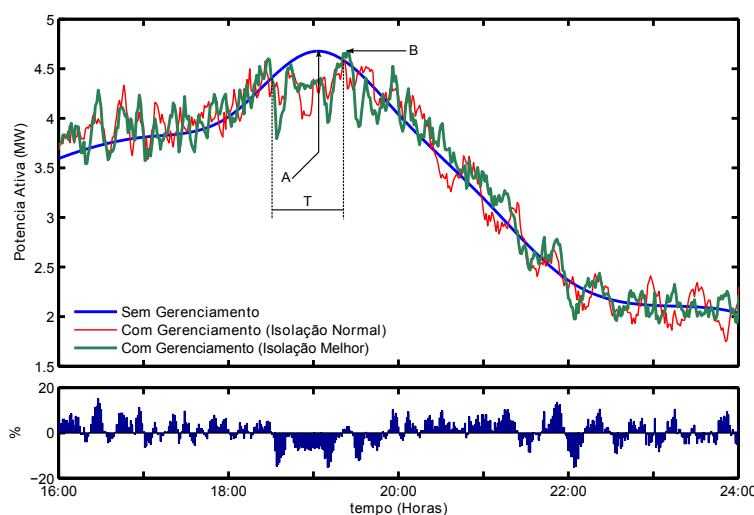
### 5.4.1 Impacto no sistema elétrico do gerenciamento de refrigeradores com melhor isolamento térmica

Assim como na seção anterior, e também nas duas próximas, analisa-se o impacto do gerenciamento na demanda de potência ativa, na subestação e nas barras do sistema, na perda ativa nos ramos do sistema e também no perfil de tensão. Aqui é feita análise do efeito que a melhoria na isolamento térmica dos refrigeradores aliada ao gerenciamento pode provocar no sistema.

#### 5.4.1.1 Impacto na demanda de potência ativa

A curva que mostra a demanda de potência ativa na subestação do sistema é apresentada na Figura 5.12. O ponto A, de maior carregamento do sistema sem gerenciamento, ocorre as 19:03 e vale 4,68 MW. Nesse mesmo instante, ao adotar o gerenciamento em refrigeradores com melhor isolamento, a demanda passa a valer 4,38 MW, proporcionando uma redução de 6,41 %, como pode ser visto parte de baixo da figura que apresenta a variação percentual da demanda de potência para esse caso. O novo pico de demanda, represen-

tado pelo ponto B vale 4,68 MW, valor igual ao pico original. O intervalo de tempo no qual a demanda fica abaixo da original é de 51 minutos. Esses resultados são mostrados na Tabela 5.3.



**Figura 5.12 – Demanda de potência ativa na subestação do sistema com refrigeradores com melhor isolação térmica.**

**Tabela 5.3 – Comparação dos resultados para os diferentes tipos de isolação.**

Parâmetro	Refrigerador sem gerenciamento e com isolação normal	Refrigerador com gerenciamento e com isolação melhor	Variação
<i>Carregamento as 19:03 (Ponto A)</i>	4,68 MW	4,38 MW	- 6,41%
<i>Maior pico de demanda (Ponto A ou B)</i>	4,68 MW	4,68 MW (às 19:24)	0 %
<i>Intervalo T</i>	---	51 minutos	---

A Tabela 5.4 apresenta o consumo diário de energia do sistema para os casos analisados. Se nos parâmetros anteriores (redução do pico e tempo em que a demanda fica abaixo da original) o gerenciamento com isolação melhor apresentou resultados praticamente iguais aos com a isolação térmica normal, o consumo de energia teve uma pequena redução de 0,03 MWh em um dia, confirmando os resultados obtidos na seção 3.7, onde se obteve que a melhoria da isolação provocava redução do consumo de energia. Naquela seção a redução do consumo foi mais acentuada, pois se levava em conta somente o funcionamento de 100 refrigeradores, enquanto que agora os refrigeradores estão inseridos num

sistema elétrico, onde há outros componentes que também interferem na demanda de potência ativa.

**Tabela 5.4 – Comparação do consumo diário de energia nos diferentes casos de isolamento térmica.**

	Sem gerenciamento e isolamento normal	Com gerenciamento e isolamento normal	Com gerenciamento e isolamento melhor
<i>Consumo diário de energia (MWh)</i>	66,06	66,05	66,03

Com relação ao impacto do gerenciamento em cada barra, a Tabela 5.5 mostra o consumo diário individual de cada uma, sem gerenciamento e com a isolamento original (A) e com gerenciamento e isolamento melhor (B).

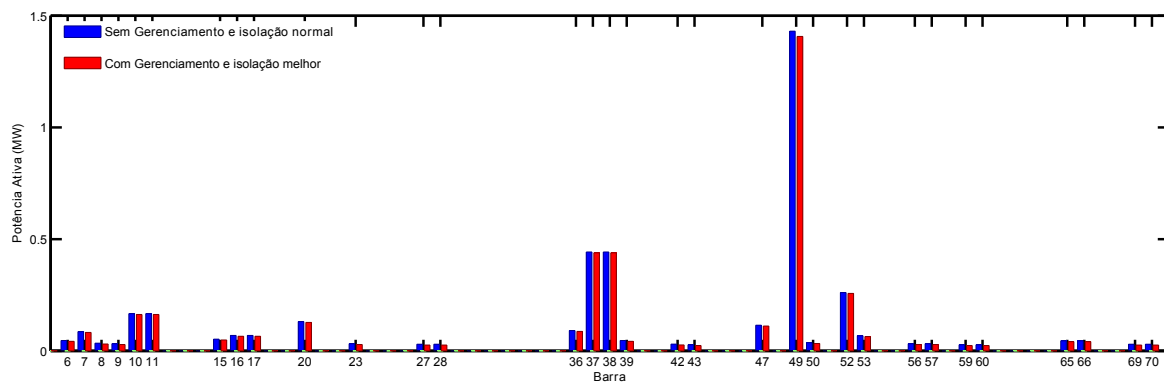
**Tabela 5.5 – Comparativo do consumo diário de energia (MWh) sem gerenciamento e isolamento normal (A) e com gerenciamento e isolamento melhor (B).**

Barra	(A)	(B)	Barra	(A)	(B)	Barra	(A)	(B)
<i>Subst.</i>	66,06	66,03	<b>23</b>	0,4663	0,4661	<b>50</b>	0,5329	0,5327
<b>6</b>	0,6728	0,6726	<b>27</b>	0,4330	0,4328	<b>52</b>	3,7806	3,7804
<b>7</b>	1,2491	1,2489	<b>28</b>	0,4330	0,4328	<b>53</b>	0,9826	0,9824
<b>8</b>	0,4996	0,4994	<b>36</b>	1,3157	1,3155	<b>56</b>	0,4663	0,4661
<b>9</b>	0,4663	0,4661	<b>37</b>	6,4070	6,4068	<b>57</b>	0,4663	0,4661
<b>10</b>	2,4149	2,4147	<b>38</b>	6,4070	6,4068	<b>59</b>	0,3997	0,3994
<b>11</b>	2,4149	2,4147	<b>39</b>	0,6745	0,6743	<b>60</b>	0,3997	0,3994
<b>15</b>	0,7576	0,7574	<b>42</b>	0,4396	0,4395	<b>65</b>	0,6532	0,6530
<b>16</b>	0,9993	0,9990	<b>43</b>	0,3997	0,3995	<b>66</b>	0,6532	0,6530
<b>17</b>	0,9993	0,9990	<b>47</b>	1,6654	1,6652	<b>69</b>	0,4330	0,4328
<b>20</b>	1,8986	1,8984	<b>49</b>	20,718	20,721	<b>70</b>	0,4330	0,4328

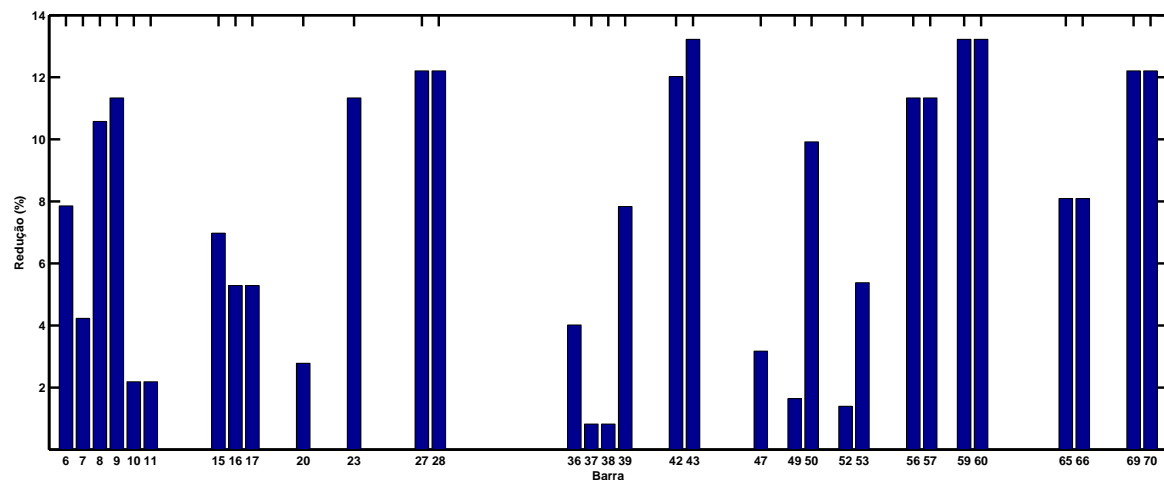
Os resultados da Tabela 5.5 mostram o que já era esperado: uma vez que houve redução no consumo diário de energia do sistema, ocorreu o mesmo individualmente em cada barra. A Figura 5.13 mostram um comparativo da demanda de potência ativa (a) no instante de maior carregamento original do sistema (19:03) e a redução percentual em cada barra (b), respectivamente.

Assim como para o caso de gerenciamento com isolamento normal, a melhoria da isolamento provoca redução do pico em todas as barras do sistema, sendo que as barras onde a quantidade de refrigeradores é menor são mais susceptíveis a variação de potência, apresentando assim as maiores reduções percentuais.





(a)

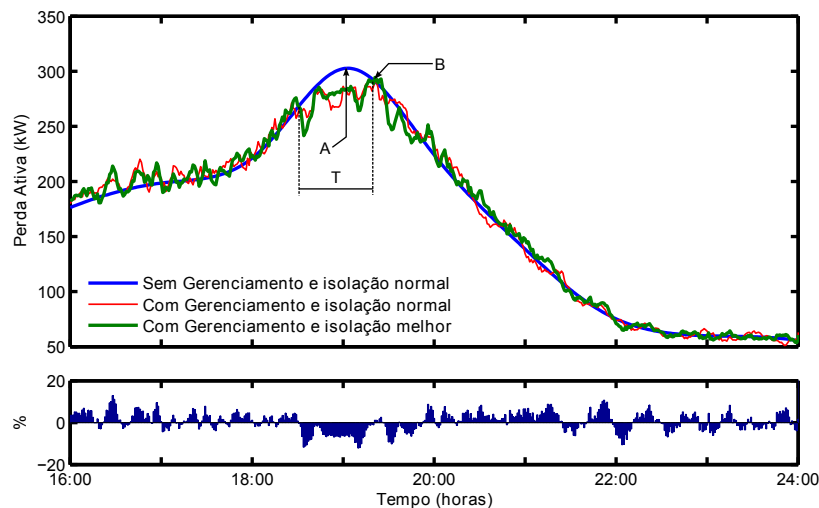


(b)

**Figura 5.13 – Demanda de potência ativa em cada barra sem gerenciamento e isolamento melhor e com gerenciamento e isolamento melhor (a) e redução em % (b) no horário de maior carregamento do sistema.**

#### 5.4.1.2 Impacto nas perdas ativas do sistema

A Figura 5.14 mostra as perdas ativas totais do sistema a partir do momento que o gerenciamento é iniciado. O intervalo de tempo  $T$  durante o qual as perdas ativas ficam abaixo da original vale 51 minutos. No momento de pico (19:03) as perdas ativas diminuem 6,1%, passando de 302,8kW para 284,3 kW e o novo pico de perda ocorre as 19:21 e vale 294,4 kW, valor 2,8 % menor, indicando que as perdas ativas com o gerenciamento não ultrapassam o valor máximo original de perda.

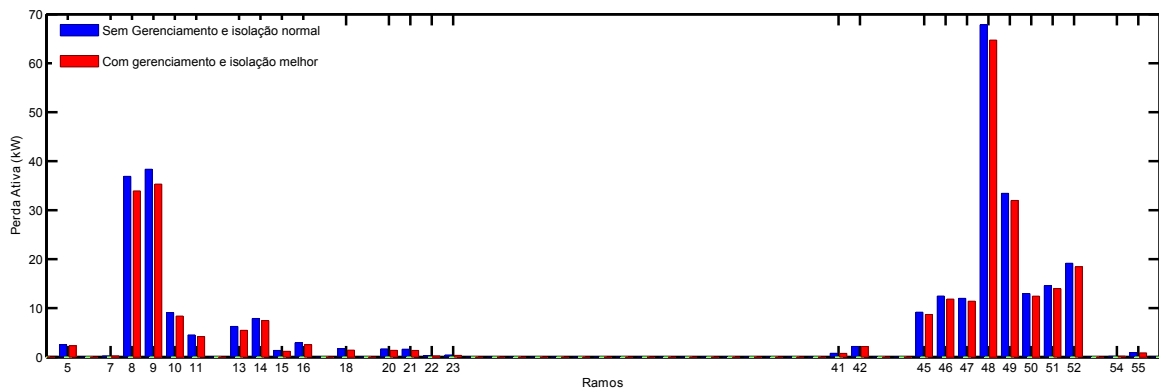


**Figura 5.14 – Perdas ativas totais no sistema sem gerenciamento e isolamento normal e com gerenciamento e isolamento melhor.**

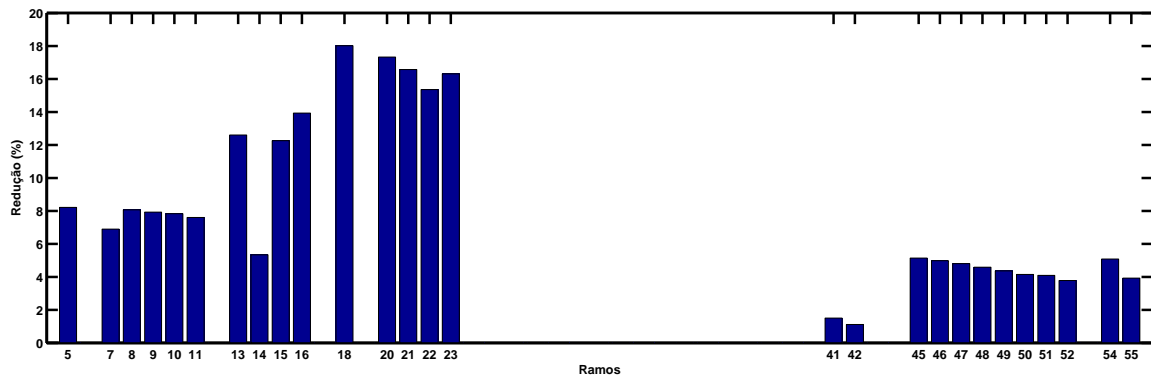
A Figura 5.15 apresenta um comparativo do valor das perdas ativas em cada ramo do sistema (a) no instante de maior carregamento (às 19:03) e a redução percentual de cada um deles (b).

Semelhante ao que acontece com a demanda de potência ativa, os ramos com menores perdas são os que apresentam maior redução percentual, uma vez que uma mesma variação de perda ativa provoca um impacto maior que num ramo onde as perdas são maiores.

Os ramos que apresentam maior redução absoluta são aqueles que apresentam maiores perdas. O ramo 48 apresenta uma redução de 3,2 kW, seguido pelos ramos 9 com redução de 3,1 kW e do ramo 8 com redução de 3,0 kW. Na Figura 5.15 (a) os ramos que não estão com perdas representadas são aqueles em que elas apresentam valores pequenos para a escala utilizada.



(a)



(b)

**Figura 5.15 – Perdas ativa em cada ramo sem gerenciamento e isolamento normal e com gerenciamento e isolamento melhor em todas as barras (a) e redução em % (b) no horário de maior carregamento do sistema.**

#### 5.4.1.3 Impacto no perfil de tensão do sistema

Outro parâmetro analisado foi o perfil de tensão do sistema e a possível melhoria que o gerenciamento em refrigeradores com isolamento melhor pode proporcionar. O perfil de tensão do sistema no instante de maior carregamento (às 19:03) é mostrado na Figura 5.16.

Como era esperado houve melhora no perfil de tensão, ficando praticamente igual ao caso onde há gerenciamento em refrigeradores com a isolamento original. A barra 53, que apresenta valor mais baixo de tensão teve seu valor elevado de 0,894 pu para 0,898 pu.

As barras que apresentaram melhoria no perfil de tensão são as mesmas indicadas na Figura 5.11.

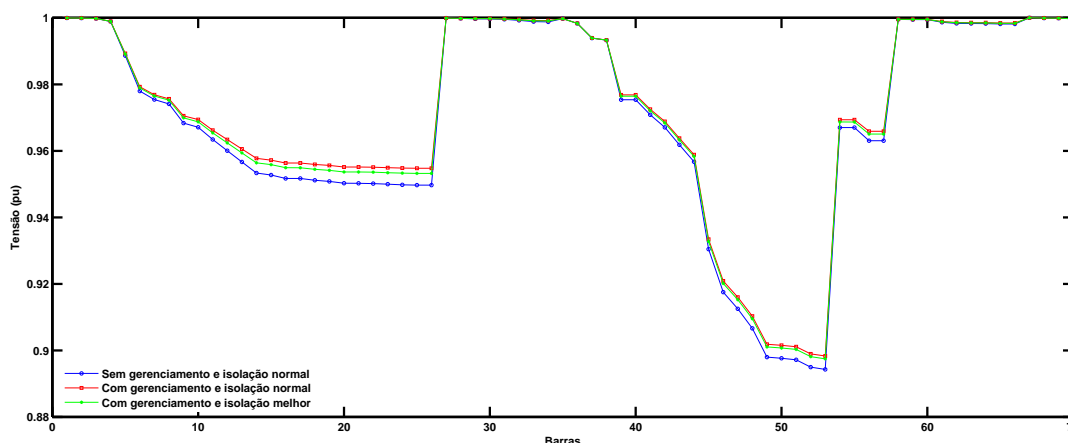


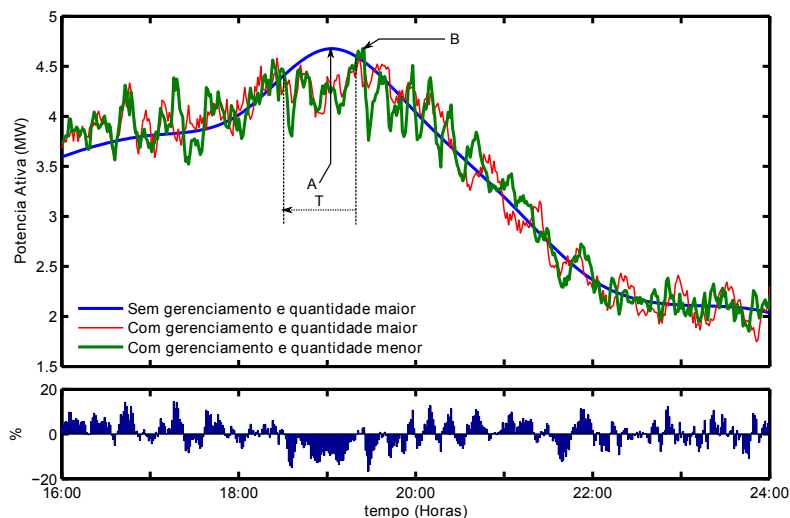
Figura 5.16 – Perfil de tensão em cada barra do sistema no horário de maior carregamento do sistema.

## 5.4.2 Impacto no sistema elétrico do gerenciamento de refrigeradores com menor quantidade de abertura de portas

Nesta seção analisa-se o benefício do gerenciamento dos refrigeradores em conjunto com aparelhos que apresentam menor número de abertura de portas. Isso é possível graças a recursos disponíveis nos refrigeradores como torneira externa de água, fazendo com que não seja necessário abrir o refrigerador tantas vezes.

### 5.4.2.1 Impacto na demanda de potência ativa

A demanda de potência ativa do sistema é mostrada na Figura 5.17. O intervalo de tempo T, onde a demanda com gerenciamento fica abaixo da original, foi de 49 minutos. No ponto A, que representa o maior carregamento do sistema, a adoção de gerenciamento em refrigeradores com menor quantidade de abertura de portas fez com que o valor da demanda nesse instante fosse reduzido de 4,68 MW para 4,26 MW, uma redução de 9,0%. O novo pico de demanda, representado pelo ponto B vale 4,68 MW, valor igual ao pico original, assim como no caso anterior (melhoria da isolamento térmica), houve deslocamento do pico de consumo para um horário em que o sistema elétrico estava com maior alívio de carga, além da duração desse novo momento de maior carregamento ser menor que anteriormente.



**Figura 5.17 – Demanda de potência ativa na subestação do sistema com refrigeradores com quantidade menor de abertura de portas.**

A Tabela 5.6 apresenta o consumo diário de energia quando não há gerenciamento e a quantidade de aberturas de porta é maior e quando há gerenciamento com quantidade menor de abertura. Novamente obteve-se o esperado de acordo com a seção 3.7: a melhoria no refrigerador proporcionou redução no consumo de energia.

**Tabela 5.6 – Comparativo do consumo diário de energia (MWh) para as diferentes quantidades de abertura de porta.**

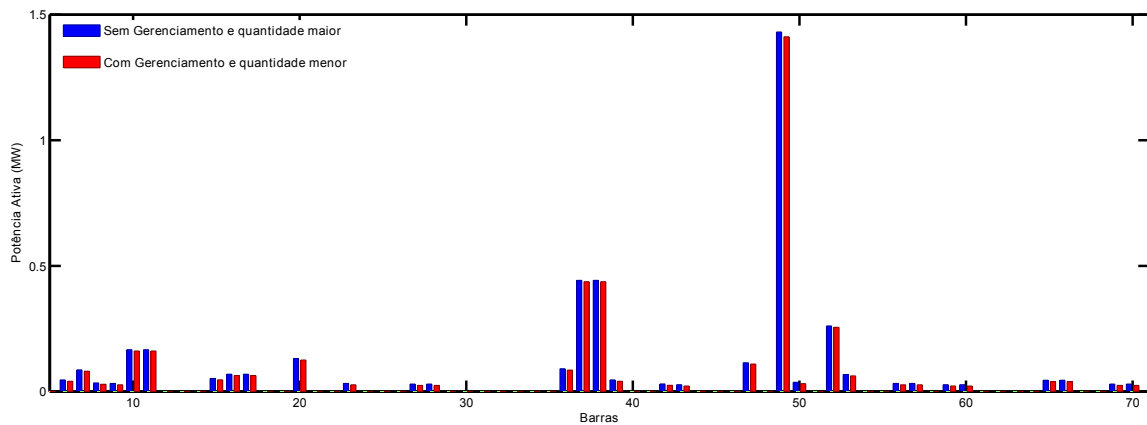
	Sem gerenciamento e quantidade maior de abertura	Com gerenciamento e quantidade maior de abertura	Com gerenciamento e quantidade menor de abertura
<i>Consumo diário de energia (MWh)</i>	66,06	66,05	66,03

A comparação do consumo diário de energia em cada barra sem gerenciamento e quantidade maior de aberturas de porta (A) e com gerenciamento e quantidade menor de abertura de portas (B) é mostrado na Tabela 5.7. Pode-se observar que o gerenciamento com a diminuição de abertura de portas proporcionou redução no consumo diário de energia em todas as barras.

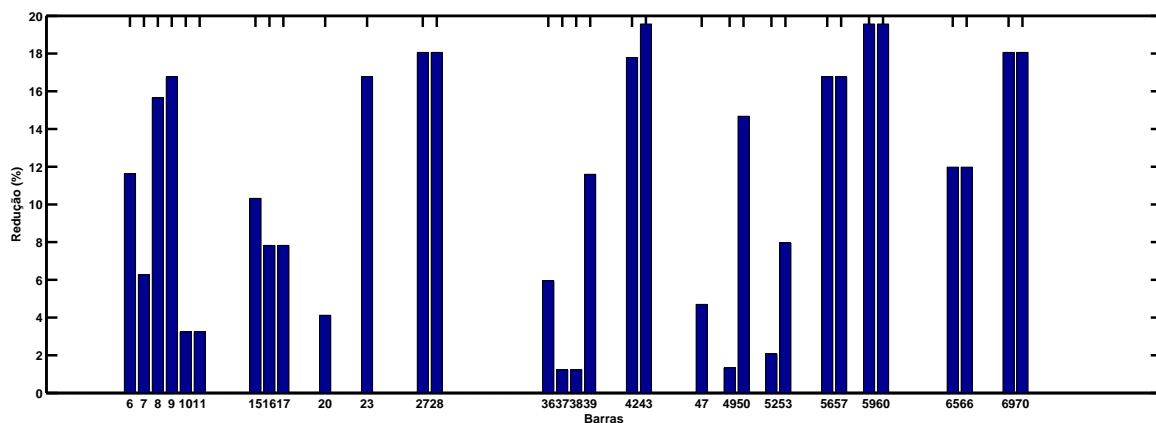
A Figura 5.18 mostra comparação da demanda no horário de pico sem gerenciamento e com gerenciamento e menos abertura de portas (a) e também a redução percentual em cada barra do sistema.

**Tabela 5.7 – Comparativo do consumo diário de energia (MWh) sem gerenciamento e quantidade maior de abertura de porta (A) e com gerenciamento e quantidade menor de abertura de porta (B).**

Barra	(A)	(B)	Barra	(A)	(B)	Barra	(A)	(B)
<i>Subst.</i>	66,06	66,03	<i>23</i>	0,4663	0,4641	<i>50</i>	0,5329	0,5327
<i>6</i>	0,6728	0,6726	<i>27</i>	0,4330	0,4328	<i>52</i>	3,7806	3,7804
<i>7</i>	1,2491	1,2489	<i>28</i>	0,4330	0,4328	<i>53</i>	0,9826	0,9824
<i>8</i>	0,4996	0,4994	<i>36</i>	1,3157	1,3155	<i>56</i>	0,4663	0,4661
<i>9</i>	0,4663	0,4661	<i>37</i>	6,4070	6,4068	<i>57</i>	0,4663	0,4661
<i>10</i>	2,4149	2,4147	<i>38</i>	6,4070	6,4068	<i>59</i>	0,3997	0,3995
<i>11</i>	2,4149	2,4147	<i>39</i>	0,6745	0,6743	<i>60</i>	0,3997	0,3995
<i>15</i>	0,7576	0,7574	<i>42</i>	0,4396	0,4395	<i>65</i>	0,6532	0,6530
<i>16</i>	0,9993	0,9991	<i>43</i>	0,3997	0,3995	<i>66</i>	0,6532	0,6530
<i>17</i>	0,9993	0,9991	<i>47</i>	1,6654	1,6653	<i>69</i>	0,4330	0,4328
<i>20</i>	1,8986	1,8984	<i>49</i>	20,718	20,722	<i>70</i>	0,4330	0,4328



(a)



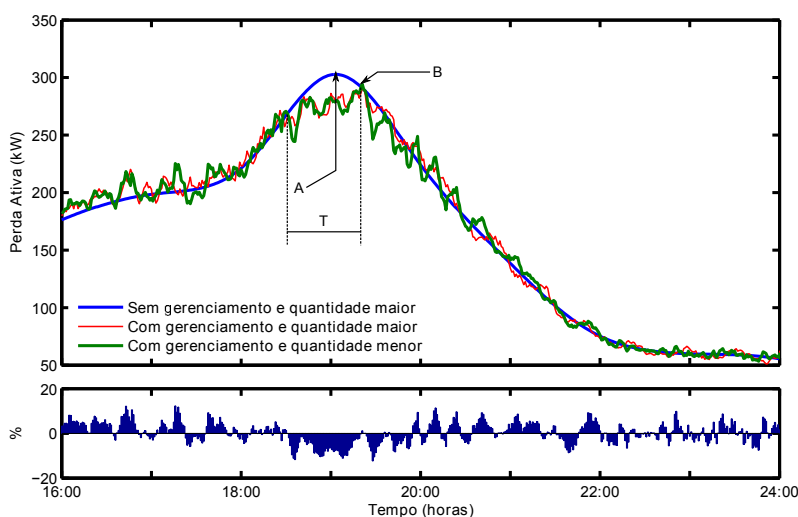
(b)

**Figura 5.18 – Demanda de potência ativa em cada barra sem gerenciamento e quantidade maior de abertura de porta e com gerenciamento e quantidade menor de abertura de porta (a) e redução em % (b) no horário de maior carregamento do sistema.**

Na Figura 5.18 (a) pode-se observar que todas as barras em que o gerenciamento foi adotado apresentaram redução da demanda no horário em que o sistema estava mais carregado. A barra 49 foi a que apresentou maior redução absoluta, 0,02 MW enquanto as barras com menor quantidade de refrigeradores foram as que apresentaram maior redução percentual, conforme já explicado.

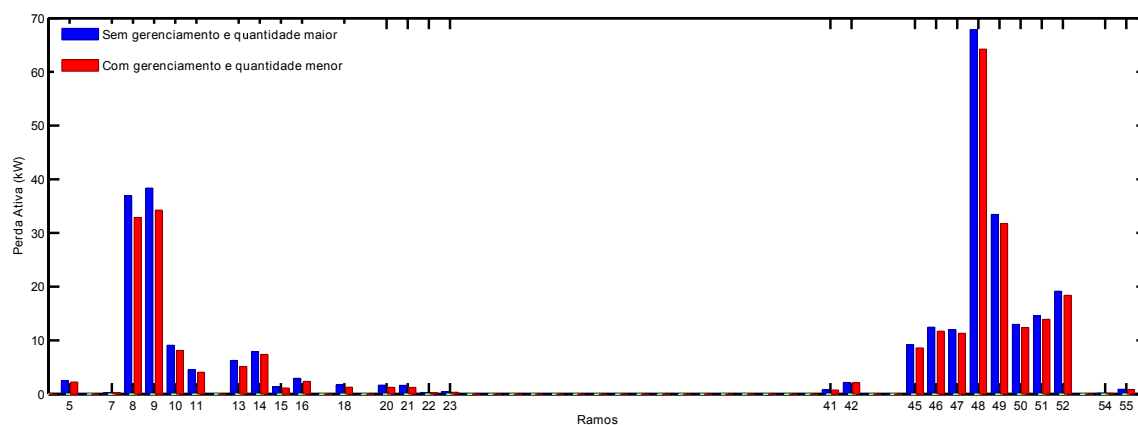
#### 5.4.2.2 Impacto nas perdas ativas do sistema

A Figura 5.19 apresenta as perdas ativas do sistema a partir do momento em que o gerenciamento é iniciado. No ponto A, a presença do gerenciamento reduziu de 302,8 kW para 279,4 kW (-7,7%) as perdas, durante o intervalo T de 49 minutos. O novo pico de perda (ponto B) vale 294,4 kW, valor 2,8% menor.

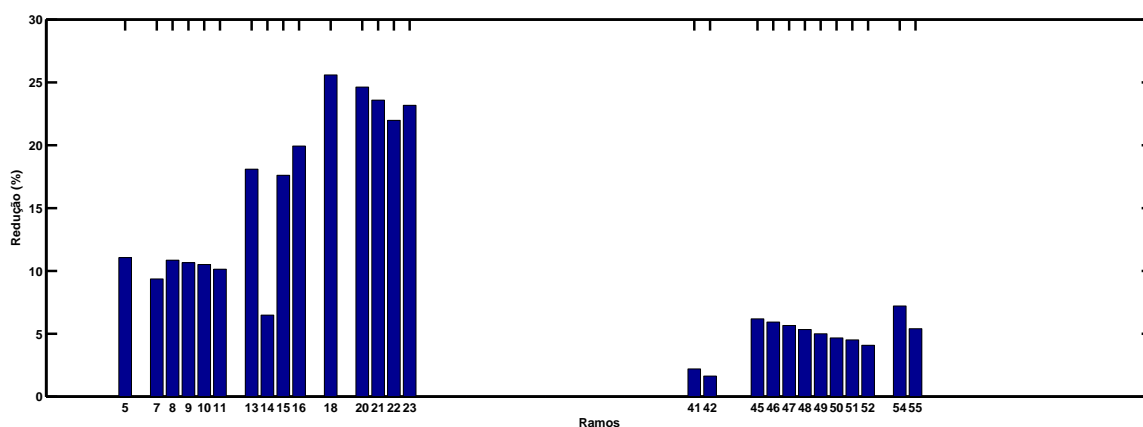


**Figura 5.19 – Perdas ativa total sem gerenciamento e quantidade maior de abertura de porta e com gerenciamento e quantidade menor de abertura de porta.**

A Figura 5.20 (a) apresenta uma comparação da perda ativa no instante de maior carregamento do sistema sem gerenciamento quantidade maior de abertura de portas e com gerenciamento e quantidade menor de abertura de portas, enquanto a figura (b) mostra a redução percentual da perda ativa nos ramos do sistema nesse instante.



(a)



(b)

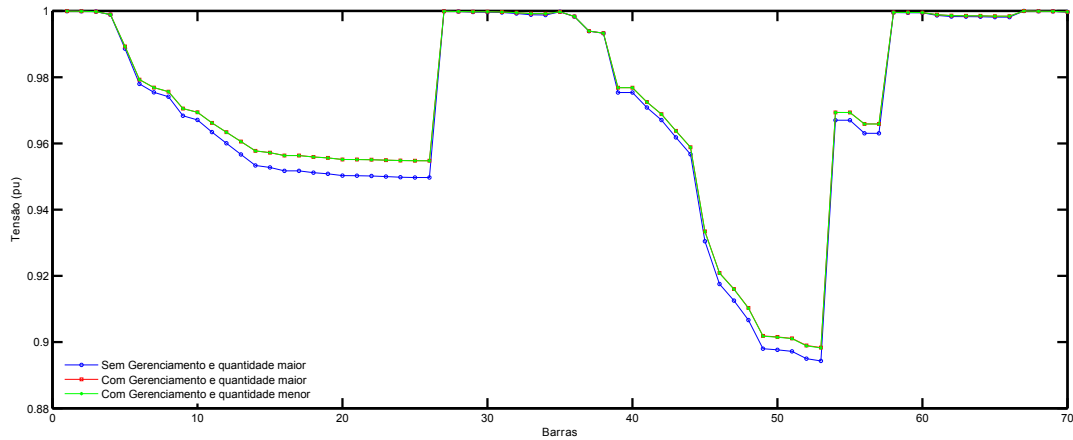
**Figura 5.20 – Perdas ativa em cada barra sem gerenciamento e quantidade maior de abertura de porta e com gerenciamento e quantidade menor de abertura de porta (a) e redução em % (b) no horário de maior carregamento do sistema.**

Os ramos com maior redução absoluta foram os que apresentam maiores perdas ativas: no ramo 8 houve redução de 4,0 kW, no ramo 9 a redução foi de 4,1 kW e no ramo 48 redução de 3,7 kW. Nos ramos onde as perdas ativas são menores, a redução percentual foi mais elevada, como por exemplo o ramo 16, que apresentou redução de 25,6%, sendo que a absoluta foi de 0,59 kW.

#### 5.4.2.3 Impacto no perfil de tensão

A Figura 5.21 mostra o perfil de tensão nas barras do sistema no instante de maior carregamento, para o caso sem gerenciamento e quantidade maior de aberturas de porta e com gerenciamento e quantidade menor de abertura de porta.





**Figura 5.21 – Perfil de tensão em cada barra do sistema no horário de maior carregamento com gerenciamento e refrigeradores com menor quantidade de abertura de portas.**

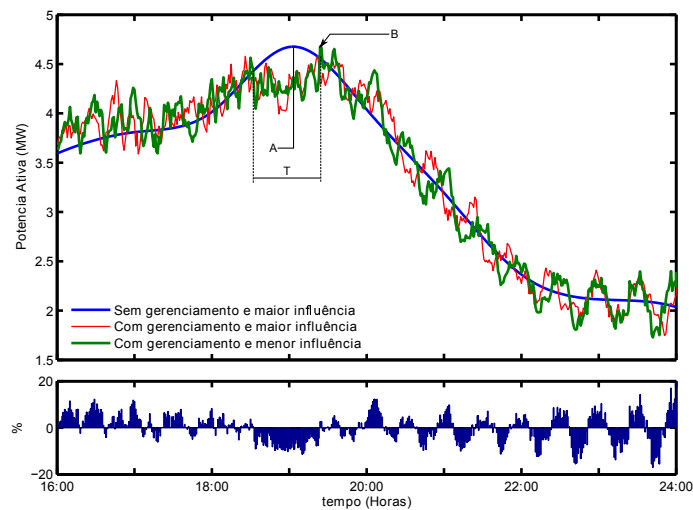
Novamente houve melhora no perfil de tensão do sistema. A barra 53, que apresentava o menor valor de tensão, teve o valor elevado de 0,894 pu para 0,898 pu, que representa um aumento de 50,6 V.

### **5.4.3 Impacto no sistema elétrico do gerenciamento de refrigeradores com menor influência da abertura de porta**

Nesta seção analisa-se a última melhoria pensada para os refrigeradores. Consiste em diminuir a entrada de ar quente em seu interior durante a abertura da porta e assim diminuir a influência desse evento no funcionamento do refrigerador.

#### **5.4.3.1 Impacto da demanda de potência ativa**

A demanda ativa do sistema a partir do início do gerenciamento é mostrada na Figura 5.22. O intervalo de tempo T no qual a demanda ficou abaixo da original foi de 56 minutos. O ponto A, referente ao horário de maior carregamento do sistema, passou de 4,68 MW para 4,37 MW, uma redução de 6,6 % na demanda. O ponto B que representa o novo pico quando o gerenciamento é adotado, vale 4,68MW, mesmo valor que o pico original, mostrando que o gerenciamento provocou o deslocamento do pico, entretanto o intervalo desse novo pico é menor que o com gerenciamento e menor influência da abertura de portas.



**Figura 5.22 – Demanda de potência ativa na subestação do sistema com menor influência de abertura de portas no refrigerador.**

A Tabela 5.8 apresenta a comparação do consumo diário de energia quando há gerenciamento com maior e menor influência da abertura da porta. Pode-se observar que quando se adota o gerenciamento e a influência é menor há redução de 0,04 MWh comparado com a ausência de gerenciamento e maior influência e 0,03 MWh quando a comparação é feita somente variando-se a influência da abertura de porta.

**Tabela 5.8 – Comparativo do consumo diário de energia (MWh) para as diferentes influência de abertura de porta.**

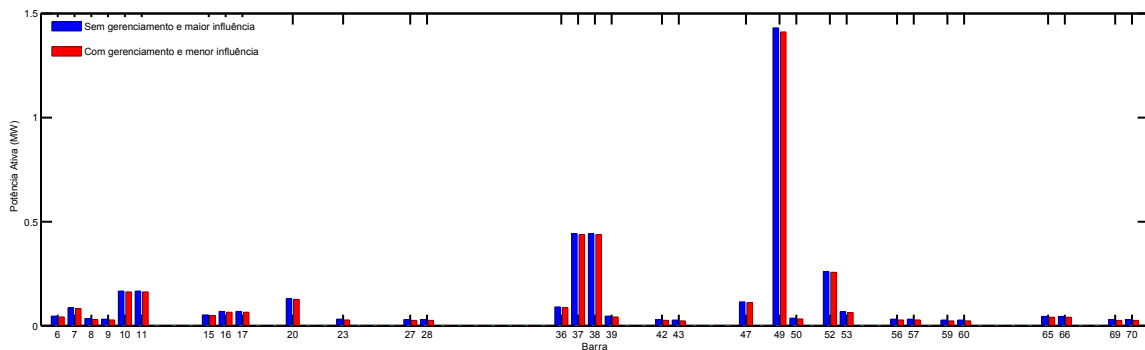
	Sem gerenciamento e maior influência	Com gerenciamento e maior influência	Com gerenciamento e menor influência
<i>Consumo diário de energia (MWh)</i>	66,06	66,05	66,02

A Tabela 5.9 mostra o resultado do gerenciamento em refrigeradores com menor influência de abertura de portas frente a sem gerenciamento e com maior influência. Nela pode-se observar que em todas as barras houve redução da energia consumida com a adoção do gerenciamento.

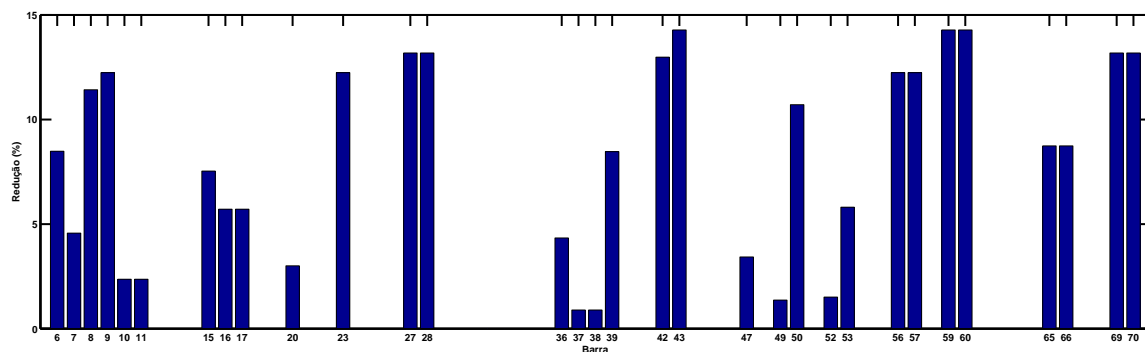
A Figura 5.23 apresenta a comparação entre a demanda de potência ativa no instante de maior carregamento (19:03) para os refrigeradores sem gerenciamento e maior influência da abertura de porta e com gerenciamento e menor influência.

**Tabela 5.9 – Comparativo do consumo diário de energia (MWh) sem gerenciamento e maior influência da abertura de porta (A) e com gerenciamento e menor influência da abertura de porta (B).**

Barra	(A)	(B)	Barra	(A)	(B)	Barra	(A)	(B)
<b>Subst.</b>	66,06	66,02	<b>23</b>	0,4663	0,4661	<b>50</b>	0,5329	0,5327
<b>6</b>	0,6728	0,6726	<b>27</b>	0,4330	0,4328	<b>52</b>	3,7806	3,7804
<b>7</b>	1,2491	1,2489	<b>28</b>	0,4330	0,4328	<b>53</b>	0,9826	0,9824
<b>8</b>	0,4996	0,4994	<b>36</b>	1,3157	1,3155	<b>56</b>	0,4663	0,4661
<b>9</b>	0,4663	0,4661	<b>37</b>	6,4070	6,4068	<b>57</b>	0,4663	0,4661
<b>10</b>	2,4149	2,4147	<b>38</b>	6,4070	6,4068	<b>59</b>	0,3997	0,3995
<b>11</b>	2,4149	2,4147	<b>39</b>	0,6745	0,6743	<b>60</b>	0,3997	0,3995
<b>15</b>	0,7576	0,7574	<b>42</b>	0,4396	0,4395	<b>65</b>	0,6532	0,6530
<b>16</b>	0,9993	0,9991	<b>43</b>	0,3997	0,3995	<b>66</b>	0,6532	0,6530
<b>17</b>	0,9993	0,9991	<b>47</b>	1,6654	1,6653	<b>69</b>	0,4330	0,4328
<b>20</b>	1,8986	1,8984	<b>49</b>	20,718	20,722	<b>70</b>	0,4330	0,4328



(a)



(b)

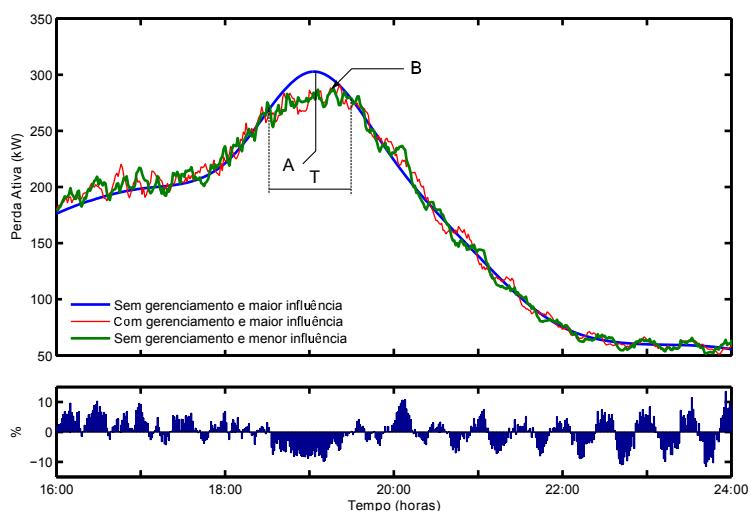
**Figura 5.23 – Demanda de potência ativa em cada barra sem gerenciamento e maior influência da abertura de porta e com gerenciamento e menor influência da abertura de porta (a) e redução em % (b) no horário de maior carregamento do sistema.**

Através da Figura 5.23 pode-se notar que em todas as barras do sistema em que foi adotado o gerenciamento houve redução da demanda de potência ativa no instante de

maior carregamento. A barra que apresentou maior redução absoluta da demanda foi a 49 com 0,02 MW, referente a 1,4%. As barras com menor quantidade de refrigerador foram as que apresentaram maior redução percentual, chegando a 14,3% na barra 43.

#### 5.4.3.2 Impacto nas perdas ativas do sistema

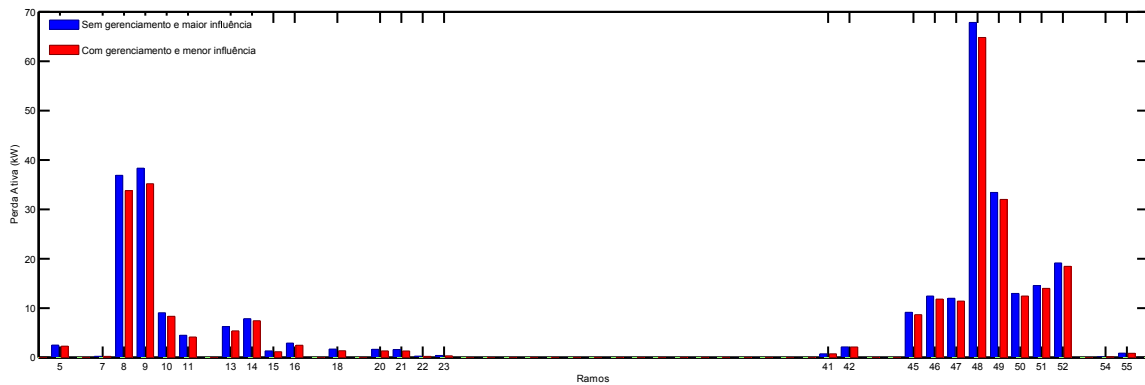
A Figura 5.24 mostra as perdas totais do sistema elétrico quando não há gerenciamento e a influência da abertura de porta é maior e quando há gerenciamento e menor influência da abertura de porta.



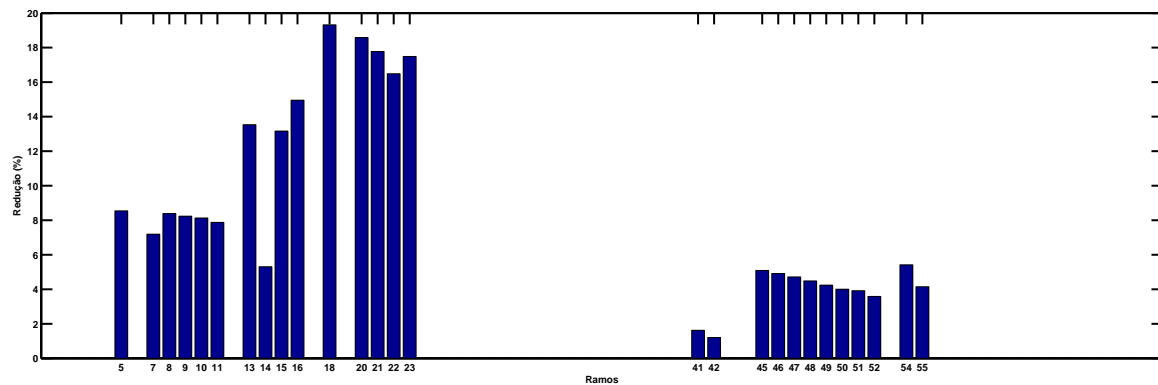
**Figura 5.24 – Perdas ativas no sistema sem gerenciamento e com maior influência da abertura de porta e com gerenciamento e menor influência.**

O intervalo de tempo T, no qual a demanda com o gerenciamento fica abaixo da original foi de 57 minutos. O ponto A, referente ao instante onde originalmente era o de maior carregamento, apresentou uma redução de 18,7 kW, passando de 302,8 para 284,1 kW, uma redução de 6,2%. O novo pico da perda, indicado pelo ponto B ocorre às 19:06 e vale 286,7 kW, uma redução de 5,3%.

A Figura 5.25 apresenta uma comparação da perda ativa no instante de maior carregamento do sistema sem gerenciamento e com maior influência da abertura de portas (a) e com gerenciamento e menor influência da abertura de portas, enquanto em (b) mostra a redução percentual da perda ativa nos ramos do sistema nesse instante.



(a)



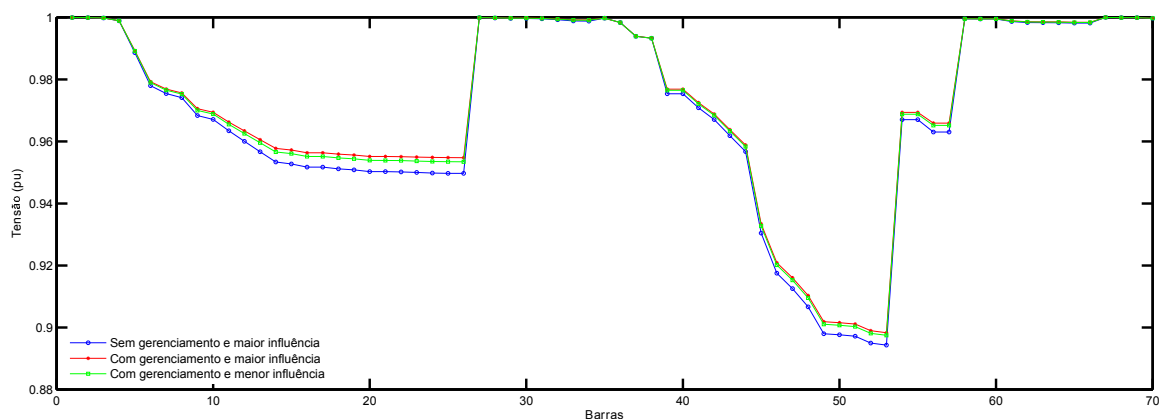
(b)

**Figura 5.25 – Perdas ativa em cada barra sem gerenciamento e maior influência de abertura de porta e com gerenciamento e menor influência de abertura de porta (a) e redução em % (b) no horário de maior carregamento do sistema.**

Os ramos que apresentaram maior redução absoluta foram os que apresentam maiores perdas ativas: no ramo 8 houve redução de 3,1 kW, no ramo 9 a redução foi de 3,2 kW e no ramo 48 redução de 3,1 kW. Nos ramos onde as perdas ativas são menores, a redução percentual foi mais elevada, como por exemplo o ramo 18, que apresentou redução de 19,3%, sendo que a absoluta foi de 0,34 kW.

#### 5.4.3.3 Impacto no perfil de tensão

A Figura 5.26 mostra o perfil de tensão nas barras do sistema no instante de maior carregamento, para o caso sem gerenciamento e maior influência da abertura de portas e com gerenciamento e menor influência da abertura de porta.



**Figura 5.26 – Perfil de tensão em cada barra do sistema no horário de maior carregamento do sistema com gerenciamento e refrigeradores com menor influência da abertura de portas.**

Observa-se que houve melhoria no perfil de tensão do sistema. A barra 53 que é a que apresenta o menor valor de tensão, teve uma elevação de 0,004pu, passando de 0,894 pu para 0,898 pu, uma diferença de 0,45% que representa 50,6 V.

## 5.5 Comparação das Melhorias

A Tabela 5.10 apresenta uma comparação dos resultados obtidos com a adoção do gerenciamento dos refrigeradores para as diferentes melhorias implementadas.

**Tabela 5.10 - Quadro comparativo geral dos resultados obtidos.**

	Sem Melhoria	Isolação Melhor	Quantidade maior de abertura de porta	Menor influência da abertura de porta
<i>Potência Ativa</i>				
<b>Redução da potência no pico (19:03)</b>	-8,9 %	-6,4 %	-9,0 %	-6,6 %
<b>Redução do novo pico de potência</b>	-2,0 %	0 %	0 %	0 %
<b>Intervalo de demanda menor que sem gerenciamento</b>	51 minutos	51 minutos	49 minutos	56 minutos
<i>Perdas Ativas</i>				
<b>Redução das perdas no pico (19:03)</b>	-7,6 %	-6,1 %	-7,7 %	-6,2 %
<b>Redução do novo pico de perdas</b>	-4,1 %	-2,8 %	-2,8 %	-5,3%
<b>Intervalo de perdas menor que sem gerenciamento</b>	54 minutos	51 minutos	49 minutos	57 minutos

Pode-se notar que em todos os casos de modificações no refrigerador houve melhorias para o sistema elétrico. Os valores obtidos com tais modificações ficaram próximos dos obtidos onde se implementou o gerenciamento sem nenhuma modificação no refrigerador. Isso evidencia que nesse caso é melhor investir em refrigeradores inteligentes, que suportem a adoção de gerenciamento de carga do que na melhoria física dos aparelhos.

## **5.6 Considerações Finais**

Neste capítulo agrupou-se tudo o que foi desenvolvido nos anteriores para analisar o impacto do gerenciamento dos refrigeradores em um sistema elétrico de distribuição. Através de fluxos de carga foi possível observar o comportamento de um sistema elétrico e verificar que o objetivo inicial desta pesquisa foi atingido, demonstrar que é possível reduzir a demanda de energia no horário de pico via gerenciamento de refrigeradores. Foram implementadas também diversas melhorias nos refrigeradores, melhoria da isolamento, melhorias que resultem na diminuição no número de abertura de portas e melhoria que diminua a perda de energia do refrigerador durante a abertura da porta. Os estudos realizados mostram que cada uma das melhorias estudadas resulta em pequenos ganhos nos índices de desempenho analisados sob o ponto de vista do sistema. Destaca-se, no entanto, que a evolução do refrigerador ocorrerá em todos os aspectos citados simultaneamente. Portanto, esses pequenos ganhos devem ser somados, resultando em ganhos mais significativos, e tornando ainda mais atrativa essa idéia do gerenciamento de refrigeradores domésticos no contexto das redes inteligentes de energia elétrica.





## Capítulo 6

### Conclusões

Esta dissertação abordou um tema que vem despertando o interesse de vários setores envolvidos com o sistema elétrico: a adoção de uma rede elétrica que seja mais inteligente que a atual, que utilize seus recursos de forma mais eficaz, que atenda a demanda de energia com mais qualidade e preserve os recursos naturais. Para isso, esse tipo de rede, dentre outros recursos, utiliza-se do gerenciamento de carga, técnica na qual a concessionária utiliza equipamentos presentes nas unidades consumidoras como uma fonte de auxílio na operação do sistema elétrico, provendo benefícios como, por exemplo, a redução da demanda de energia no horário de pico, o controle de tensão e frequência, etc.

O equipamento doméstico escolhido para ser gerenciado foi o refrigerador, já que graças a seu isolamento e inércia térmica pode permanecer desligado por um período sem que isso afete o usuário, característica principal para que um equipamento possa participar de programas de gerenciamento. Outro fator importante para sua escolha é a grande quantidade deste equipamento nas residências, apresentando assim um potencial energético para a prática.

Para o desenvolvimento do trabalho buscou-se um modelo que representasse de forma simples, mas fiel o funcionamento do refrigerador. Foi adotado um modelo que descreve a dinâmica térmica em seu interior, representando também distúrbios usuais no seu funcionamento, como a abertura de porta e a inserção de alimentos. O modelo proposto apresentou comportamento satisfatório e semelhante a um refrigerador real.

O passo seguinte foi escolher um tipo de gerenciamento para implantar num grupo de refrigeradores. Foram propostos três tipos, cada qual com suas vantagens e desvantagens, sendo escolhido para o trabalho aquele que apresentou o maior número de características favoráveis: maior tempo de redução da demanda de potência ativa sem ocasionar picos de demanda que ultrapassasse os originais, causando carga adicional no sistema elétrico durante algum tempo.

Por fim, através de fluxos de carga em um sistema elétrico, analisou-se o impacto que o gerenciamento dos refrigeradores ocasionaria na demanda de potência ativa, nas perdas ativas do sistema e também no perfil de tensão, sendo que os três parâmetros apresentaram melhoria. A demanda de potência ativa foi o parâmetro onde o benefício foi mais destacado. Houve uma considerável redução no período de maior carregamento do sistema. Esta redução durou intervalos de tempo que se aproximaram de 1 hora, resultado similar ao horário de verão. Além disso, o novo pico de demanda incluindo o gerenciamento não extrapola o valor original, tendo ficado abaixo em alguns casos e no mesmo valor em outros. As perdas ativas apresentaram comportamento semelhante, com redução em todos os ramos do sistema e duração em períodos semelhantes à demanda de potência. O perfil de tensão também teve melhoria e embora não sejam tão acentuadas são bem vindas, uma vez que para isso não foi necessário incrementar a infraestrutura do sistema elétrico.

Também se analisou o efeito que melhorias no refrigerador poderiam ter. Dentre as melhorias sugeridas, refrigeradores com melhor isolamento térmica e com artifícios para diminuir a quantidade de abertura das portas e a influência que este evento provocaria no funcionamento. As duas últimas opções já se encontram disponíveis em alguns refrigeradores, através de reservatórios de água e gelo, que permitem que estes sejam consumidos sem a necessidade de abrir a porta e também através de cortinas de ar, que dificultam a entrada de ar quente e saída de ar frio do refrigerador quando se abre a porta. A melhoria da isolamento foi estudada com o intuito de analisar o uso de equipamentos mais energeticamente. Deve-se ressaltar, no entanto, que os refrigeradores atuais já apresentam níveis de isolamento muito bons e melhorá-los significaria aumentar a espessura de suas paredes ou desenvolvimento de isolantes ainda melhores. Destaca-se, que cada melhoria estudada resultou em um ganho marginal. No entanto, caso ocorram de forma simultânea esses ganhos devem ser somados, tornando o refrigerador ainda mais atrativo para o tipo de gerenciamento proposto, no contexto das redes elétricas inteligentes do futuro.

Assim o trabalho cumpriu com seus objetivos: desenvolver um modelo para os refrigeradores, implementar técnicas de gerenciamento e obter redução da demanda de potência ativa no horário de pico.

## **6.1 Sugestões para trabalhos futuros**

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- O uso do gerenciamento de refrigeradores ou outros equipamentos para controle de tensão e frequência em sistemas elétricos;
- Uso de gerenciamento de refrigeradores para absorver as oscilações provocadas por fontes de energia renováveis, como eólica;
- Estudo da adoção de práticas de tarifas variáveis em patamares e em tempo real e o impacto que teriam para os consumidores e para o sistema.
- A inclusão de outros equipamentos no gerenciamento de carga, explorando o conceito das residências inteligentes.



# Referências Bibliográficas

- [1] Collier, S. E. (2009). *Ten Steps to a Smarter Grid*. IEEE Rural Electric Power Conference, pp. B2 - B2-7.
- [2] Momoh, J. A. (2009). *Smart Grid Design for Efficient and Flexible Power Networks Operation and Control*. Power Systems Conference and Exposition IEEE/PES, pp. 1-8.
- [3] A. Moshari, G. R. Yousefi, A. Ebrahimi, S. Haghbin (2010). *Demand-side Behavior in the Smart Grid Environment*. Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), pp. 1-7.
- [4] Brown, R.E. (2008). *Impact of Smart Grid on Distribution System Design*. IEEE Power and Energy General Meeting, pp. 1-4.
- [5] Zimmerman, R. D., Murillo-Sanchez, C. E. (2011). *MATPOWER 4.0 User's manual*.
- [6] Bellarmine, G. T. (2000). *Load Management Techniques*. Southeastcon Proceedings of IEEE, pp. 139-145.
- [7] Paracha, Z.J.; Doulai, P. (1998). *Load Management: Techniques and Methods in Electric Power System*. Energy Management and Power Delivery ,vol 1, pp. 213-217.
- [8] U. S. Department of Energy. (2008) *The Smart Grid: an introduction*.
- [9] Bennett, C., Highfill, D. (2010). *Network in AMI Meters*. IEEE Energy Conference,
- [10] The Energy Policy Initiatives Center University of San Diego School of Law (2006). *San Diego Smart Grid Study – Final Report*.
- [11] Hamidi, V., Furong Li, Liangzhong Yao, Bazargan, M. (2008). *Domestic Demand-side Management for Increasing the Value of Wind*. CIGRE Electric Distribution, p. 1-10, Dec. 2008.F
- [12] ANEEL (2010). *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional*, Revisão 2

- [13] Serrão, F. C. C. (2003). *Modelo de Previsão de Carga de Curto Prazo Utilizando Redes Neurais e Lógica Fuzzy*. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio.
- [14] ONS (2010). *O ONS e a Operação do Sistema Interligado Nacional*, disponível em [www4.planalto.gov.br/centrodeestudos/galeria-de-fotos/arquivos-importados/apresentação-visita-cnos](http://www4.planalto.gov.br/centrodeestudos/galeria-de-fotos/arquivos-importados/apresentação-visita-cnos)
- [15] Francisquini, A. A. (2006). *Estimação de Curvas de Carga em Pontos de Consumo e em Transformadores de Distribuição*. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP.
- [16] Gellings, C. W. (1985). *The Concept of Demand-Side Management for Electric Utilities*. Proceedings of IEEE, v. 73, n.10, p. 1468-1470.
- [17] Thornley, V., Kemsley, R., Barbier, C., Nicholson, G. (2008). *User Perception of Demand Side Management*. CIRED Seminar SmartGrids for Distribution, p. 1-4.
- [18] Strbac, G. (2008). *Demand Side Management: Benefits and Challenges*. Energy Policy v. 36, i. 12, p. 4419-4426.
- [19] Palensky, P. (2009). *Electric Load Management and Information Technology*. IEEE Africon 2009, p. 1-5.
- [20] ANEEL (2009). *Implantação de Medição Eletrônica em Baixa Tensão*. Documento anexo à nota técnica nº 0013/2009-SRD/ANEEL.
- [21] Lamim, H. (2009). *Medição Eletrônica em Baixa Tensão: Aspectos Regulatórios e Recomendações para Implantação*. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade de Brasília.
- [22] Hossain, M.R.; Maung Than Oo, A.; Shawkat Ali, A.B.M. (2010). *Evolution of Smart Grids and Some Pertinent Issues*. Universities Power Engineering Conferences, pp. 1-6.
- [23] Hamidi, V.; Smith, K.S.; Wilson, R.C. (2010). *Smart Grid Technology Review and Some Pertinent Issues*. IEEE Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, pp.1-8.

- [24] Popescu, M.O.; Popescu, C.; Stefanescu, A. (2010). *Smart Grids – Challenges and Solutions*. 3<sup>rd</sup> International Symposium on Electrical and Electronics Engineering, pp. I-III.
- [25] Kreith, F., Bohn, M. S. (2003). *Princípios de Transferência de Calor*. Pioneira Thomson Learning.
- [26] IBGE (2008). *Domicílios Particulares Permanentes, por Existência de Alguns Bens Duráveis Segundo as Unidades da Federação*.
- [27] ELETROBRAS-PROCEL (2010). *Consumo de Eletrodomésticos*.
- [28] EPE (2011). *Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica*. Ano IV, nº 42.
- [29] Carmeis, D. W. M. (2002). *Os Efeitos da Diversidade de Tensões de Distribuição no Setor Elétrico Brasileiro. Estudo do Caso do Refrigerador Doméstico*. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – Universidade Estadual de Campinas.
- [30] Manual Refrigerador Frost Free 330L modelo BRM33A.
- [31] Laguerre, O., Flick, D. (2004). *Heat Transfer by Natural Convection in Domestic Refrigerators*. Journal of Food Engineering, 62, pp. 79-88.
- [32] Garcia-Valle, R., da Silva, L. C. P., Xu, Z., Ostergaard J. (2009). *Smart Demand for Improving Short-term Voltage Control on Distribution Networks*, IET Generation, transmission & distribution, vol. 3, pp. 724-732.
- [33] Gonçalves, J. R. (1989). *Desempenho de um Congelador Doméstico na Rotina Caseira*. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia de Alimentos – Universidade Estadual de Campinas.
- [34] Cepagri (2009). *Dados Diários Estação Meteorológica Automática*.
- [35] Alissi, M. S. (1987). *The Effect of Ambient Temperature, Ambient Humidity and Door Openings on Household Refrigerator Energy Consumption*. MSME thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana.

- [36] Grimes, J. G., Willian, P.E.M., Shomaker, B.L. (1977). *Effect of Usage Conditions on Household Refrigerator-freezer and Freezer Energy Consumption*. ASHRAE transactions, 83(1), pp. 818-828.
- [37] Parker, D. S., Steadman, T. C. (1992). *Measured Savings of Refrigerator Replacement: Case Study and Analysis*. American Council for Energy Efficiency Economy, Washington DC.
- [38] Masjuki, H. H., Saidur, R., Choudhury, I. A., Mahlia, T. M. I. (2000). *Factors Effecting Energy Consumption of Household Refrigerator-freezers*. Proceedings IEEE TENCON, v.2, pp. 92-96.
- [39] Baran, M. E., Wu, F. F. (1989). *Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems*. IEEE Transactions on Power Delivery, v.4, pp. 725-734.
- [40] Zimmerman, R. D., Murillo-Sanchez, C. E., Thomas, R. J. (2009). *MATPOWER's Extensible Optimal Power Flow Architecture*. IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp.1-7.
- [41] Meier, A. (1995). *Refrigerator Energy Use in the Laboratory and in the Field*. Energy and Buildings, 22, pp. 233-243.
- [42] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). *Resultado Preliminar da Implantação do Horário de Verão 2008/2009*.



# Apêndice A

## Transferência de Calor

A transferência de calor é definida como a transmissão de energia de uma região a outra, sempre que existir gradiente de temperatura num sistema ou dois sistemas com temperaturas diferentes forem colocados em contato. Essa transferência de calor pode ocorrer de três formas: condução, convecção e radiação, sendo que para o modelo de refrigerador serão consideradas somente as duas primeiras ([25]).

### A.1 Transferência de Calor por Condução

A condução de calor ocorre num meio sólido, na presença de um gradiente de temperatura, ocasionando um fluxo de calor do meio de temperatura alta para o de temperatura baixa. Considerando que o meio é homogêneo, a taxa de transferência de calor por condução valerá:

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} \quad (\text{A.1})$$

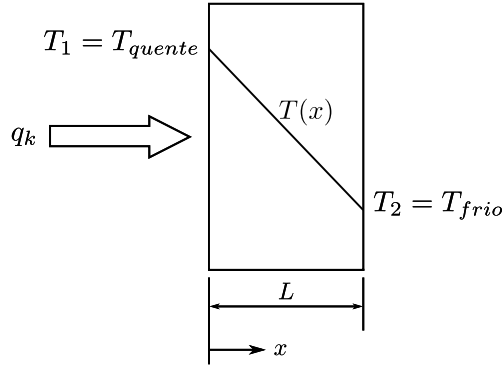
onde  $T$  é a temperatura local,  $x$  é a distância na direção do fluxo de calor,  $A$  é a área através da qual o calor é transferido,  $k$  é a condutividade térmica (propriedade física do meio em que ocorre a condução) e o sinal negativo é consequência da segunda lei da termodinâmica, que exige que o calor flua de uma região mais quente para uma mais fria.

#### A.1.1 Condução de Calor em Paredes Planas

Se o fluxo de calor for unidimensional e estacionário através de uma parede plana, não haverá variação do fluxo e do gradiente de temperatura com o tempo. A área da seção transversal é uniforme, o que permite reescrever a equação (A.1) da seguinte forma:

$$\frac{q_k}{A} = \int_0^L dx = - \int_{T_{\text{quente}}}^{T_{\text{frio}}} k dT \quad (\text{A.2})$$

Os limites de integração são verificados conforme a Figura A.1. Se  $k$  for independente da temperatura, obtém-se a relação mostrada na equação (A.3).



**Figura A.1 - Distribuição da temperatura através de parede plana para condução em caso estacionário.**

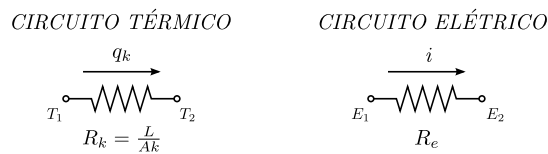
$$q_k = \frac{Ak}{L} (T_{quente} - T_{fria}) = \frac{\Delta T}{L/Ak} \quad (A.3)$$

Na equação (A.3),  $\Delta T$  é o impulsor do fluxo de calor através da parede e  $L/Ak$  é a resistência que a parede oferece a esse fluxo, sendo chamada de resistência térmica de condução ( $R_k$ ).

$$R_k = \frac{L}{Ak} \quad (A.4)$$

A Figura A.2 mostra a analogia que existe entre sistemas onde há fluxo de calor e circuitos elétricos. A corrente  $i$  vale  $E_1 - E_2$  dividido por  $R_e$ , enquanto  $q_k$  é igual a  $T_1 - T_2$  dividido por  $R_k$ . Também há o análogo para o inverso da resistência, a condutância térmica  $K_k$ , definida por:

$$K_k = \frac{Ak}{L} \quad (A.5)$$



**Figura A.2 - Analogia entre sistemas térmicos e circuitos elétricos.**

## A.2 Transferência de Calor por Convecção

A convecção consiste, na realidade, de dois mecanismos operando simultaneamente: transferência de energia através do movimento molecular (modo condutivo) e transferência de energia através do movimento macroscópico de parcelas do fluido. Independente de detalhes do mecanismo de funcionamento, a taxa de transferência de calor por convecção entre uma superfície e um fluido pode ser calculada a partir da seguinte relação:

$$q_c = \bar{h}_c A \Delta T \quad (\text{A.6})$$

onde  $q_c$  é a taxa de transferência de calor (W),  $A$  é a área de transferência de calor ( $\text{m}^2$ ),  $\Delta T$  é a diferença entre a temperatura da superfície e a temperatura num ponto do fluido num ponto longe da superfície (K) e  $\bar{h}_c$  é o coeficiente médio de transferência de calor por convecção sobre a área  $A$  ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ).

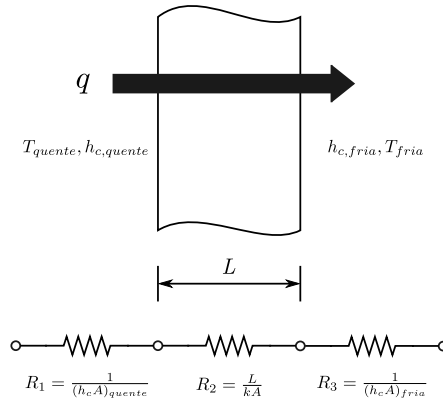
Analogamente à condução, pode-se definir uma resistência térmica de convecção ( $R_c$ ) bem como a condutância de convecção ( $K_c$ ):

$$R_c = \frac{1}{\bar{h}_c A} \quad (\text{A.7})$$

$$K_c = \bar{h}_c A \quad (\text{A.8})$$

## A.3 Condução e Convecção em Série

Na engenharia, os problemas de transferência de calor combinam mais de um modo e um dos casos mais comuns é a transferência entre dois fluidos separados por uma parede, como a Figura A.3.



**Figura A.3 - Transferência de calor entre dois fluídos separados por uma parede.**

Num caso como o da Figura A.3, a resistência térmica total será dada pela associação em série de cada uma das resistências (convecção do lado de temperatura quente e Figura A.4, a resistência térmica total é obtida da seguinte forma:

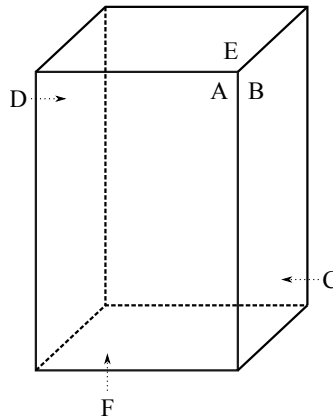
$$Q_{total} = Q_A + Q_B + Q_C + Q_D + Q_E + Q_F \quad (A.9)$$

$$Q_{total} = \frac{\Delta T}{R_{eq}} \quad (A.10)$$

Como  $Q_F = 0$  e  $\Delta T$  é o mesmo para todas as paredes,

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_D} + \frac{1}{R_E} = \sum_i \frac{1}{R_i} \quad (A.11)$$

De acordo com a equação (A.11), a resistência total num sistema como um refrigerador será dada pela associação em paralelo das resistências de cada parede.



**Figura A.4 - Sistema térmico composto por várias paredes.**